



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA

“Modelado matemático y construcción de dos elementos resistivos, para el análisis de sobretensiones debido a impulsos de tipo maniobra en alta tensión”

AUTORES:

Julián Guillermo Castro Bayas

John Erick Jara Fajardo

DIRECTOR:

Ing. Daniel Santos Contreras Ramírez, Msc.

GUAYAQUIL, DICIEMBRE 2016

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Gary Ampuño
DIRECTOR DE CARRERA
INGENIERÍA ELÉCTRICA

Ing. Roy Santana
DIRECTOR DE PROYECTO
TITULACIÓN

Ing.....
VOCAL

Ing.....
VOCAL

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, JULIAN GUILLERMO CASTRO BAYAS y JOHN ERICK JARA FAJARDO autorizamos a la **Universidad Politécnica Salesiana** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, Diciembre, 08, 2016

f) _____

Autor: Julián Guillermo Castro Bayas

Cédula: 0926223900

f) _____

Autor: John Erick Jara Fajardo

Cédula: 0704272871

CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS

Yo, **JULIÁN GUILLERMO CASTRO BAYAS**, con documento de identificación N° **0926223900** y **JOHN ERICK JARA FAJARDO**, con documento de identificación N° **0704272871**, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de grado titulado “**MODELO MATEMÁTICO Y CONSTRUCCIÓN DE DOS ELEMENTOS RESISTIVOS, PARA EL ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES DEBIDO A IMPULSOS DE TIPO MANIOBRA EN ALTA TENSIÓN**”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación de lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Diciembre, 08, 2016

f) _____

Autor: Julián Guillermo Castro Bayas

Cédula: 0926223900

f) _____

Autor: John Erick Jara Fajardo

Cédula: 0704272871

**CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR**

Yo, **DANIEL SANTOS CONTRERAS RAMÍREZ**, director del proyecto de titulación denominado “MODELO MATEMÁTICO Y CONSTRUCCIÓN DE DOS ELEMENTOS RESISTIVOS, PARA EL ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES DEBIDO A IMPULSOS DE TIPO MANIOBRA EN ALTA TENSIÓN”, realizado por los estudiantes, **JULIÁN GUILLERMO CASTRO BAYAS** y **JOHN ERICK JARA FAJARDO**, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, Diciembre, 08, 2016

f).....

Daniel Santos Contreras Ramírez

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado principalmente a Dios, por permitirme llegar con salud y vida hasta este tramo de mi carrera, a mis padres, mi hermano y mis abuelitos, por el apoyo incesante e incondicional y también por ser siempre ese pilar fundamental para el crecimiento y desarrollo de la persona que soy hoy en día. Personas que siempre me impulsaron a seguir adelante y buscar cada vez más.

Julián Guillermo Castro Bayas

Dedico este trabajo de titulación primero a Dios por mantenerme con fuerzas para seguir adelante y darme la suficiente sabiduría que conlleva todo este proceso. A mis padres, mis hermanos y demás familiares que han sido un pilar fundamental en mi vida y quienes siempre han sabido inculcarme y guiarme con buenos valores en la vida; los cuales han sido de gran valor para la culminación de este trabajo.

John Erick Jara Fajardo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme guiado hasta este momento tan importante que es presentar este trabajo de titulación.

Agradezco también a mi madre por siempre luchar por regalarme una buena educación y enseñarme buenos valores en mi etapa de crecimiento personal y profesional, por cada uno de los consejos que me das a diario.

A mis abuelitos les agradezco por siempre estar pendientes de mi crecimiento, por cada uno de los extractos de vida que me han enseñado y me hacen mucho más fuerte frente a alguna adversidad.

Agradezco a mis profesores a lo largo de mi carrera universitaria, por haber compartido sus conocimientos para formar unos excelentes profesionales.

Un agradecimiento especial al Ing. Ervin Solano y al Ing. Daniel Contreras, por la ayuda a este trabajo de titulación y así poder llegar al objetivo.

Julián Guillermo Castro Bayas

Quiero agradecer de forma muy especial a Dios que siempre me dio las fuerzas para seguir adelante.

A mis padres, Ing. Milko Jara Calderón y Dra. María Elena Fajardo, a mis hermanos Alex y Carolina que de una u otra forma han sabido guiarme y aconsejarme a lo largo de mi vida personal y profesional y ser incondicionalmente mi apoyo.

A mi novia, Ing. Paola Cabrera Romero, que ha sabido ser un pilar fundamental en momentos de dificultad.

A los Ingenieros Andrés Aguirre Alonso y Jefferson Villavicencio Vera por brindarnos su ayuda con dicho trabajo de titulación.

John Erick Jara Fajardo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN	II
CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TIULACIÓN	III
CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS	IV
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR.....	V
DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTOS	VII
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XIX
RESUMEN	XX
ABSTRACT	XXI
INTRODUCCIÓN	XXII
CAPÍTULO 1: EL PROBLEMA	1
1.1. Descripción del problema.	1
1.2. Importancia y alcances.....	1
1.3. Delimitación.....	1
1.4. Objetivos.....	2
1.4.1. Objetivo general.....	2
1.4.2. Objetivos específicos.....	2
1.5. Metodología.....	2

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	4
2.1. Sistema eléctrico de potencia.....	4
2.2. Impulso.....	6
2.3. Sobretensiones, concepto – causa.....	7
2.4. Clasificación de las sobretensiones.....	7
2.4.1. Sobretensiones de origen externo (por descargas atmosféricas). ...	7
2.4.2. Sobretensiones de origen interno (por maniobra de interruptores).	8
2.5. Sobretensiones tipo maniobra.....	10
2.5.1. Energización o cierres de líneas.....	11
2.5.2. Re-cierre de líneas.....	12
2.6. Fundamentos de la generación de voltaje de impulso.....	12
2.6.1. Generación de altas tensiones.....	12
2.6.2. Circuito generador de impulso de simple etapa.....	13
2.6.3. Generación de impulso de maniobra	15
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MODELADO MATEMÁTICO	17
3.1. Recursos utilizados para la generación de impulso.....	17
3.2. Elementos importantes a ser tomados en cuenta.....	30
3.2.1. Transformador	31
3.2.2. Diodo rectificador.....	32
3.2.3. Circuito rectificador de media onda.....	32
3.2.4. Rectificador de onda completa	33
3.2.5. Voltímetro de esferas	34
3.3. Modelado Matemático	35
3.3.1. Cálculo de resistencias de 55 K Ω y 118 K Ω	35
3.4. Construcción de elementos resistivos de 55 K Ω y 118 K Ω	45

3.4.1.	Diseño y construcción de resistencias de alambre enrollado.....	45
3.4.2.	Prueba teórica de calibración en resistencia de 55 K Ω	46
3.4.3.	Prueba práctica de calibración en resistencia de 55 K Ω y margen de error.....	48
3.4.4.	Prueba teórica de calibración en resistencia de 118 K Ω	48
3.4.5.	Prueba práctica de calibración en resistencia de 118 K Ω y margen de error.....	49
3.5.	Construcción de cápsulas para resistencias de 55 K Ω y 118 K Ω	50
3.6.	Construcción de tapas para sellado de resistencias.....	51
3.7.	Construcción de anillos y puntas para sellado de resistencias.	52
3.8.	Ensamblado de las resistencias.	52
3.8.1.	Pruebas de aislamiento en cápsulas de elementos resistivos.....	54
3.9.	Ensamble total de los elementos resistivos.....	56
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		58
4.1.	Simulación.	59
4.1.1.	Simulink.....	59
4.1.2.	GUI de MATLAB®.....	61
4.1.3.	Realización de interfaz gráfica.	62
4.1.3.1.	Presentación.	62
4.1.3.2.	Parámetros de cálculo.	64
4.2.	Análisis y comparación de resultados.....	71
4.2.1.	Análisis de gráficas simuladas.....	71
4.2.2.	Análisis de gráficas prácticas.....	76
4.2.3.	Comparación de resultados.....	84
CONCLUSIONES		90

RECOMENDACIONES.....	91
BIBLIOGRAFIA	92
ANEXOS	95

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: DIAGRAMA DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.	5
FIGURA 2: DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MANABÍ.	6
FIGURA 3: FORMA DE ONDA NORMALIZADA TIPO RAYO.....	8
FIGURA 4: FORMA DE ONDA NORMALIZADA TIPO MANIOBRA.	9
FIGURA 5: ENERGIZACIÓN O CIERRE DE LÍNEA.	11
FIGURA 6: RE-CIERRE DE UNA LÍNEA.	12
FIGURA 7: TRANSFORMADORES EN CASCADA.....	13
FIGURA 8: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO DE SIMPLE ETAPA A. .	14
FIGURA 9: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO DE SIMPLE ETAPA B. .	14
FIGURA 10: MODELO PARA LA TRANSFORMADA DE LAPLACE.	15
FIGURA 11: TÍPICAS FORMAS DE ONDA DE LAS SUBESTACIONES DE MANIOBRA.	15
FIGURA 12: FORMA DE ONDA DE IMPULSO DE MANIOBRA SEGÚN RECOMENDACIONES DE LA IEC.	16
FIGURA 13: ESCRITORIO DE CONTROL.....	17
FIGURA 14: TRANSFORMADOR DE PRUEBA.....	18
FIGURA 15: MEDIDOR DE VOLTAJE.	18
FIGURA 16: MEDIDOR DE VOLTAJE DIRECTO.....	19
FIGURA 17: MEDIDOR DE VOLTAJE DE IMPULSO.	19
FIGURA 18: DIVISOR DE VOLTAJE O CAPACITOR DE ACOPLAMIENTO.	20
FIGURA 19: CAPACITOR DE IMPULSO.	20

FIGURA 20: CAPACITOR DE CARGA.....	21
FIGURA 21: CAPACITOR DE MEDICIÓN.....	21
FIGURA 22: BARRA AISLANTE.	22
FIGURA 23: RECTIFICADOR DE SILICIO.	22
FIGURA 24: RESISTENCIA DE CARGA.....	23
FIGURA 25: RESISTENCIA DE FRENTE DE ONDA.....	23
FIGURA 26: RESISTENCIA DE COLA DE ONDA.	24
FIGURA 27: ESPINTERÓMETRO.	24
FIGURA 28: TIMONEL DE ESPINTERÓMETRO.....	25
FIGURA 29: RESISTENCIA PARA MEDICIÓN.	25
FIGURA 30: INTERRUPTOR PUESTA A TIERRA.....	26
FIGURA 31: PÉRTIGA DE DESCARGA.....	26
FIGURA 32: COPA CONECTORA.....	27
FIGURA 33: BASE PEDESTAL.....	27
FIGURA 34: CONECTOR DE ALUMINIO.....	28
FIGURA 35: CONECTOR DE BASE DE ALUMINIO.	28
FIGURA 36: ESPINTERÓMETRO A VACÍO.....	29
FIGURA 37: ESPINTERÓMETRO PARA MEDICIÓN.	29
FIGURA 38: RECIPIENTE PARA PRUEBAS DE ACEITE AISLANTE.	30
FIGURA 39: DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UN TRANSFORMADOR.....	31
FIGURA 40: CURVA CARACTERÍSTICA DE UN DIODO IDEAL.	32
FIGURA 41: RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA.....	33
FIGURA 42: PUENTE RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA.....	34
FIGURA 43: EXPLOSOR A ESFERAS O ESPINTERÓMETRO VERTICAL.	34

FIGURA 44: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO DE UNA ETAPA POR LAPLACE.	35
FIGURA 45: CIRCUITO ANALIZADO CON LA TRANSFORMADA DE LAPLACE	36
FIGURA 46: ANÁLISIS DE FRENTE DE ONDA PARA TIEMPO T1.	42
FIGURA 47: ANÁLISIS DE COLA DE ONDA PARA TIEMPO T2.	43
FIGURA 48: RESISTENCIAS Y MEDIDAS DE CONSTRUCCIÓN.	46
FIGURA 49: COMPROBACIÓN DE NIVELES DE RESISTENCIA DE 55 KΩ.	47
FIGURA 50: COMPROBACIÓN DE NIVELES DE RESISTENCIA DE 118 KΩ.	48
FIGURA 51: DISEÑO DE CÁPSULA PARA RESISTENCIAS.	51
FIGURA 52: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE TAPAS.	51
FIGURA 53: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ANILLOS Y PUNTAS.	52
FIGURA 54: ENSAMBLADO DE RESISTENCIAS.	52
FIGURA 55: MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE CÁPSULA DE LABORATORIO.	54
FIGURA 56: MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE CÁPSULA 1.	55
FIGURA 57: MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE CÁPSULA 2 ANTES DE COLOCAR BARNIZ.	55
FIGURA 58: MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE CÁPSULA 2 DESPUÉS DE COLOCAR BARNIZ.	56
FIGURA 59: ENSAMBLE TOTAL DE LOS ELEMENTOS.	57
FIGURA 60: MULTÍMETRO Y AMPERÍMETRO FLUKE.	58
FIGURA 61: ELEMENTOS PARA HACER ENSAMBLADOS.	58

FIGURA 62: LIBRERÍA DE SIMULINK.	59
FIGURA 63: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO EN SIMULINK.	61
FIGURA 64: GUI (GRAPHICAL USER INTERFACE).....	61
FIGURA 65: CREACIÓN DEL GUIDE.	63
FIGURA 66: GUIDE DE PRESENTACIÓN.	63
FIGURA 67: CALCULADORA DE RESISTENCIAS.	64
FIGURA 68: SIMULACIÓN REAL DE CÁLCULO DE RESISTENCIAS.....	69
FIGURA 69: SIMULACIÓN REAL DE IMPULSO DE MANIOBRA.	70
FIGURA 70: INTERFAZ DE GENERACIÓN DE IMPULSO.	70
FIGURA 71: GRÁFICA SIMULADA A 45100 V.	73
FIGURA 72: GRÁFICA SIMULADA A 59100 V.	74
FIGURA 73: GRÁFICA SIMULADA A 74800 V	76
FIGURA 74: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO	77
FIGURA 75: ARMADO DE CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO.....	77
FIGURA 76: ARMADO DE ELEMENTOS DE CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO.....	78
FIGURA 77: CONTROL VISUAL PARA PRUEBAS DE GENERACIÓN DE IMPULSO.....	78
FIGURA 78: IMPULSO DE GENERACIÓN A 45100 V (OSCILOSCOPIO).....	80
FIGURA 79: IMPULSO DE GENERACIÓN A 59100 V (OSCILOSCOPIO).....	82
FIGURA 80: IMPULSO DE GENERACIÓN A 74800 V (OSCILOSCOPIO).....	83
FIGURA 81: COMPARACIÓN DE GRÁFICA REAL VS GRÁFICA SIMULADA A 45100 V.....	85
FIGURA 82: COMPARACIÓN DE GRÁFICA REAL VS GRÁFICA SIMULADA A 59100 V.....	87

FIGURA 83: COMPARACIÓN DE GRÁFICA REAL VS GRÁFICA SIMULADA A 74800 V.....	88
FIGURA 84: COMPARACIÓN FINAL DE GRÁFICA REAL VS GRÁFICA SIMULADA DE IMPULSO DE MANIOBRA.	89

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: FORMA NORMALIZADA DE LA SOBRETENSIÓN.....	9
TABLA 2: MANIOBRAS QUE PUEDEN CAUSAR SOBRETENSIONES EN EL SISTEMA.	10
TABLA 3: CONSTANTES PARA EL CÁLCULO DEL GENERADOR.	42
TABLA 4: CÁLCULO TEÓRICO DE RESISTENCIA 55K Ω	47
TABLA 5: CÁLCULO PRÁCTICO DE RESISTENCIA 55K Ω Y MARGEN DE ERROR.....	48
TABLA 6: CÁLCULO TEÓRICO DE RESISTENCIA 118K Ω	49
TABLA 7: CÁLCULO PRÁCTICO DE RESISTENCIA 118K Ω Y MARGEN DE ERROR.....	50
TABLA 8: GENERACIÓN DE VOLTAJE A 45100 V. (SIMULADO).....	72
TABLA 9: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE TIEMPO IDEAL VS TIEMPO DE SIMULACIÓN A 45100 V. (SIMULADO).....	72
TABLA 10: GENERACIÓN DE VOLTAJE A 59100 V. (SIMULADO).....	73
TABLA 11: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE TIEMPO IDEAL VS TIEMPO DE SIMULACIÓN A 59100 V. (SIMULADO).	74
TABLA 12: GENERACIÓN DE VOLTAJE A 74800 V. (SIMULADO).....	74
TABLA 13: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE TIEMPO IDEAL VS TIEMPO SIMULADO A 74800 V. (SIMULADO).....	75
TABLA 14: GENERACIÓN DE VOLTAJE A 45100 V. (PRÁCTICO).	79
TABLA 15: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE TIEMPO REAL VS TIEMPO IDEAL A 45100 V. (PRÁCTICO).	80
TABLA 16: GENERACIÓN DE VOLTAJE A 59100 V. (PRÁCTICO).	81

TABLA 17: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE TIEMPO REAL VS TIEMPO IDEAL A 59100 V. (PRÁCTICO).....	81
TABLA 18: GENERACIÓN DE VOLTAJE A 74800 V. (PRÁCTICO).....	82
TABLA 19: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE TIEMPO REAL VS TIEMPO IDEAL A 74800 V. (PRÁCTICO).....	83
TABLA 20: COMPARACIÓN DE RESULTADOS A 45100 V Y SEPARACIÓN A 5 MM.....	84
TABLA 21: COMPARACIÓN DE RESULTADOS A 59100 V Y SEPARACIÓN A 8 MM.....	86
TABLA 22: COMPARACIÓN DE RESULTADOS A 748100 V Y SEPARACIÓN A 10 MM.....	87

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: FACTOR DE SOBRETENSIÓN.....	7
ECUACIÓN 2: LEY DE VOLTAJE DE KIRCHHOFF.....	36
ECUACIÓN 3: LEY DE CORRIENTE DE KIRCHHOFF.....	36
ECUACIÓN 4: RESISTENCIA DE FRENTE DE ONDA.....	44
ECUACIÓN 5: RESISTENCIA DE COLA DE ONDA.....	44
ECUACIÓN 6: LEY DE OHM.....	53

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se analizó el circuito de generación de impulso para el cual de los dos tipos de circuitos de generación estandarizados para el test o pruebas de sobretensiones, se priorizó uno de ellos por su eficiencia al momento de alcanzar el voltaje de impulso con respecto a su voltaje ingresado. Pero a su vez, lo más importante es que está basado en el modelo matemático del circuito de generación de impulso elegido, el cual está realizado en el estudio del circuito en la Transformada de Laplace. Dicho trabajo se simuló en una interfaz gráfica llamada MATLAB®.

Posterior a esto, utilizando el modelo matemático, se realizó el cálculo respectivo de las resistencias bajo la correcta coordinación con los capacitores del laboratorio para así poder tener un impulso tipo maniobra con el menor porcentaje de error para las pruebas que realizamos en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil

Luego construimos los elementos resistivos que fueron necesarios para el trabajo de titulación, los mismos que contaron con los requerimientos para obtener el impulso de maniobra deseado; los equipos constan con sus respectivas resistencias de alta tensión, la fibra de vidrio como carcasa de nuestra resistencia y los acoples para los elementos. Teniendo en cuenta todos estos elementos realizamos las prácticas en el laboratorio e hicimos la simulación del comportamiento del impulso; corroborando los estándares normalizados en la norma IEC 60071-1 para generación de impulso.

Palabras clave: MATLAB, SIMULACIÓN, GENERACIÓN DE IMPULSO.

ABSTRACT

In the present work the impulse generation circuit was analyzed for which of the two types of generation circuits standardized for the test of overvoltage, one of them was prioritized by its efficiency at the moment of reaching the voltage of impulse with respect to input voltage. But in turn, the most important thing is that it is based on the mathematical model of the chosen impulse generation circuit, which is done in the study of the circuit in the Laplace Transform. This work was simulated in a graphical interface called MATLAB®

Subsequently, using the mathematical model, the respective calculation of the resistances was carried out under the correct coordination with the capacitors of the laboratory in order to have a maneuvering type of impulse with the lowest percentage of error for the tests performed in the High Voltage Laboratory of the Universidad Politecnica Salesiana, headquarters Guayaquil.

Then we constructed the resistive elements that were necessary for the work, the same ones that had the requirements to obtain the desired maneuvering impulse. The equipment consists of their respective high voltage resistances, fiberglass as our resistance housing and couplings for the elements. Taking into account all these elements we performed the practices in the laboratory and did the simulation of the behavior of the impulse; corroborating the standards normalized in the manual IEC 60071-1 for impulse generation.

Keywords: MATLAB, SIMULATION, PULSE GENERATION.

INTRODUCCIÓN

Todos los países buscan contar con un completo sistema de interconexiones de sus redes de transmisión, lo que permite proporcionar el elemento más importante para el crecimiento económico. Se invierten enormes cantidades de dinero para generar diferentes cambios, implementando nuevas tecnologías a todo lo que conforma el sistema eléctrico de potencia (SEP), esto se realiza incrementando los niveles de generación de potencia y tensión eléctrica para la transmisión.

No solo podemos pensar en el incremento de la generación sin un preciso análisis de cada uno de los factores que inciden en el SEP, por lo que se tiene que priorizar la estabilidad. El SEP debe contar con un robusto sistema de seguridad y confiabilidad para que cada uno de sus equipos pueda seguir en sincronismo.

Por lo que podemos decir, que uno de los problemas del cual no se puede prescindir su análisis son los transitorios o sobretensiones; los mismos que siguen a una perturbación del sistema oscilatorio natural; pero, si este sistema es estable, las oscilaciones serán amortiguadas y llevarán a su correcto procedimiento de operación y de equilibrio.

En este fenómeno se ven afectados temporalmente distintas variables eléctricas como son voltaje, corriente y frecuencia, ocasionando huecos de tensión o sobretensiones, los mismos que en su momento de acción, generan un gran esfuerzo al aislamiento de los diferentes equipos conectados en los tramos de las líneas de transmisión.

Los diferentes tipos de sobretensiones a las que se ve sometido un SEP y los equipos conectados a la red eléctrica son las sobretensiones por descargas atmosféricas (tipo rayo) y sobretensiones por maniobras de apertura y cierre (tipo maniobra), ante estos fenómenos, las sobretensiones se propagan por lo largo de la línea de transmisión a una gran velocidad hacia equipos conectados a las líneas de transmisión, dando como resultado ondas reflejadas y refractadas frente a una onda sinusoidal natural.

Teniendo como base estudios del comportamiento de un SEP se toma como referencia el análisis de sobretensiones de maniobra para la coordinación de aislamiento que maneja la norma IEC (Publicación 60071-1, 1976).

Un SEP es una parte muy compleja, debido a cambios continuos o constantes en su régimen de operación. Sus diseños no solamente están ligados a condiciones normales, sino también a condiciones anormales que pueden presentarse en distintas instancias al momento de conexión y desconexión de un elemento en una red eléctrica. En la actualidad, los criterios que se manejan para poder diseñar la aislación en sistemas de potencia de alta tensión, están basados en el análisis de sobretensiones de maniobra. Por tal motivo es de suma importancia realizar este análisis en los sistemas eléctricos de potencia de alta tensión.

CAPÍTULO 1: EL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema.

En la actualidad el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana no cuenta entre sus inventarios, equipos con el cual permita realizar un análisis o una práctica del efecto que ocurre en la red cuando se presenta una sobretensión de tipo maniobra.

Así mismo, tener en cuenta que los documentos para la elaboración de prácticas con los que cuenta el laboratorio de Alta Tensión se encuentran en inglés, lo cual, muchas veces impide la correcta comprensión de ciertos términos que se emplean en el mismo, es por ello que nos planteamos la siguiente pregunta:

¿Cómo se puede aportar de forma física y experimental a la Universidad Politécnica Salesiana, para el análisis y desarrollo práctico de la materia de Alta Tensión 1?

1.2. Importancia y alcances.

Conocemos que las líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica se encuentran a la intemperie al igual que subestaciones de distribución; así como hay encapsuladas, existen también subestaciones que reciben todo tipo de embates de la naturaleza por el cual es necesario realizar prácticas de las mismas para así poder tener una idea más real de lo que pueda suceder al ocurrir una sobretensión, lo cual será un elemento importante para el estudio de la materia de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana.

1.3. Delimitación.

Las pruebas se realizaron en la Universidad Politécnica sede Guayaquil con resistencias importadas de 55 y 118 K Ω respectivamente; realizándose en condiciones normales de acuerdo al ambiente que está diseñado el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general.

Diseñar un modelo matemático y construir dos elementos resistivos para el análisis de sobretensiones debido a impulsos de tipo maniobra en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Plantear las ecuaciones diferenciales para determinar el efecto de sobretensiones de tipo maniobra.
- Realizar el modelado matemático de la práctica de generación de impulso utilizando el software MATLAB®.
- Construir dos elementos resistivos para la simulación práctica en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Comprobar los datos obtenidos y establecer márgenes de errores con respecto a la normativa IEC 60071-1

1.5. Metodología.

Para poder desarrollar el tema propuesto en el trabajo de titulación se usó el método científico general, ya que es el más acorde para poder realizar las prácticas y convalidar con la teoría.

Los métodos específicos utilizados han sido:

Observación: Para comprender y entender la noción de los fenómenos producidos humanamente y vincularlos con los que se presentan en el laboratorio de Alta Tensión.

Medición: Observar y registrar minuciosamente todo aquello que en el objeto de estudio y de acuerdo con la teoría, sea relevante.

Experimentación: Permite desarrollar ejercicios en el laboratorio que reafirmen o eliminen la hipótesis antes planteada.

Validación teórico-práctico: Comparar lo realizado en las prácticas y contrastarlo generando una conjetura que explique lo ocurrido.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Sistema eléctrico de potencia.

La energía eléctrica es primordial para el desarrollo de un país a nivel mundial, dicha energía debe suministrarse de forma adecuada y oportuna, y para eso se necesita de un buen sistema eléctrico de potencia (SEP); que, día tras día se van volviendo más modernos ya que se incrementan y geográficamente se expanden más, además hay muchas interconexiones en sistemas aislados y sistemas regionales. En la actualidad, la energía eléctrica suma un papel muy importante a nivel mundial, ya que hoy en día, sin este no podría echarse a andar ningún proyecto, debido a que requiere del uso y operación de equipos eléctricos. Por lo que esto obliga a que un SEP cuente con instalaciones confiables que estén diseñadas bajo normativas técnicas de análisis donde se incorporen todos los fenómenos que se presentan en cualquier estado del sistema. (Ramírez, 2008).

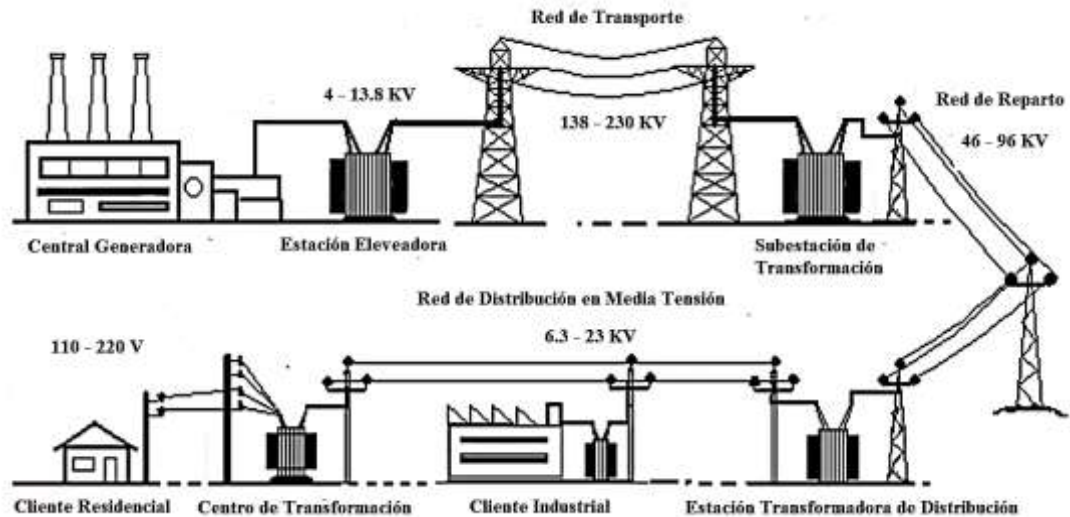
Un sistema eléctrico de potencia cuenta con diferentes etapas, las mismas que comprenden:

- Generación
- Transmisión y sub-transmisión
- Distribución y comercialización

Según la Agencia de Control y Regulación de Electricidad (ARCONEL), se determinó los siguientes niveles de voltaje:

- Bajo voltaje: inferior a 0,6 KV
- Medio voltaje: entre 0,6 y 40 KV
- Alto voltaje: mayor a 40 KV

FIGURA 1: DIAGRAMA DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.

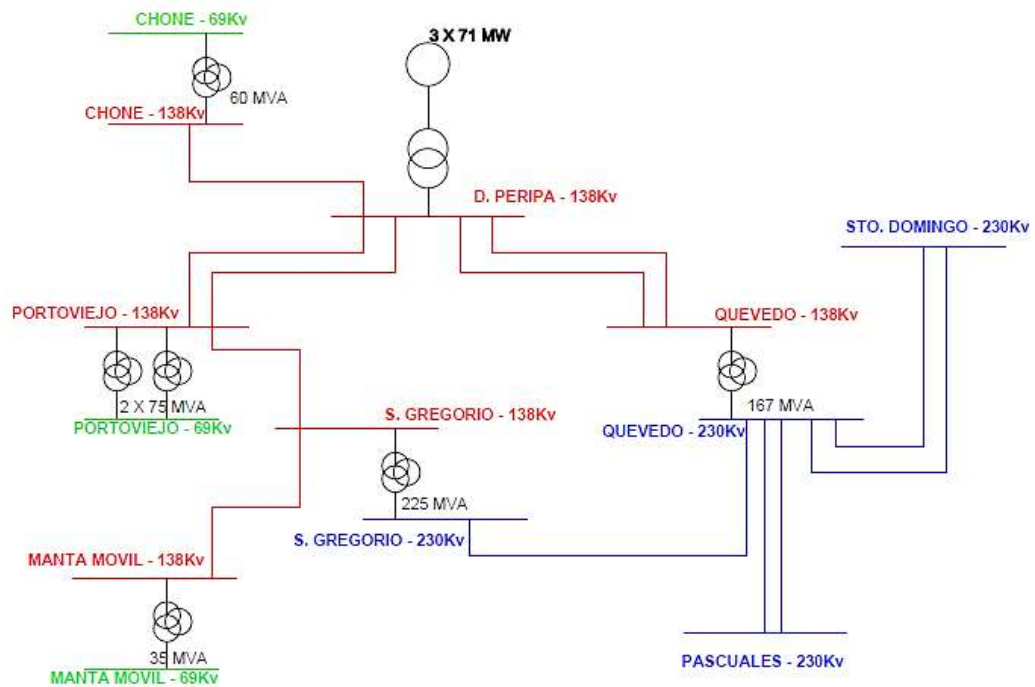


(MOREJÓN PINTO, 2016)

Para alcanzar este objetivo, es necesario: Generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica desde los centros de generación, ubicados en base a la disponibilidad de fuentes primarias de energía, ver Fig. 1.

La principal función de un SEP es garantizar la continuidad y seguridad del suministro eléctrico y la correcta coordinación del sistema de producción y transporte. Así mismo para poder lograr cada uno de los objetivos de un SEP debemos tener en cuenta el correcto dimensionamiento y coordinación de las protecciones para cada uno de los elementos y etapas que conllevan su uso. Cada una de las etapas que comprende una red eléctrica necesita un análisis minucioso, por lo que es primordial realizar un diagrama unifilar (ver Fig. 2) de todos los elementos que comprende nuestro sistema.

FIGURA 2: DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MANABÍ.



(MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍAS RENOVABLES, 2015)

A su vez debemos saber que el transitorio que sigue a una perturbación del sistema es oscilatorio por naturaleza pero el sistema es estable, estas oscilaciones serán amortiguadas y llevarán al sistema a una nueva condición de operación y de equilibrio. Dichas oscilaciones, sin embargo, son reflejadas como fluctuaciones en el flujo de potencia sobre las líneas de transmisión.

Si una interconexión conecta dos grandes grupos de máquinas, experimentando excesivas fluctuaciones de potencia, puede ser disparada por su equipamiento de protecciones, de tal modo que desconecta los grupos de equipos.

La estabilidad del sistema eléctrico es un importante problema en la seguridad de la operación del sistema, la mayoría de colapsos causados por inestabilidad ilustran la importancia de este fenómeno. Por lo que, para cada aspecto de un SEP es necesario hacer también un análisis de sobretensiones; tema que se abordará a continuación.

2.2. Impulso.

Un impulso es un transitorio aperiódico de tensión o corriente, el cual usualmente tiene rápidos picos de tensión máxima para luego caer a cero o regresar a su estado de estable

en forma más lenta. Dentro de los impulsos se diferencian los de tipo rayo y tipo maniobra como los más importantes por los tiempos de duración de cada una.

2.3. Sobretensiones, concepto – causa.

Se denomina sobretensión a todo aumento de tensión capaz de poner en peligro el material de una instalación eléctrica. La relación entre sobretensión y la nominal de servicio se llama factor de sobretensión.

ECUACIÓN 1: FACTOR DE SOBRETENSIÓN.

$$K_s = \frac{U_1}{U}$$

(TORRESI, 2004)

Las sobretensiones pueden, además de producir descargas que destruyan o averíen severamente el material, ser la causa de otras sobretensiones.

Si a pesar de todas previsiones y precauciones que se pueden tomar en una instalación, se producen sobretensiones, deben procurarse que descarguen a tierra lo más pronto posible por medio de los correspondientes dispositivos de protección llamados descargadores de sobretensión. (Torresi, 2003).

2.4. Clasificación de las sobretensiones.

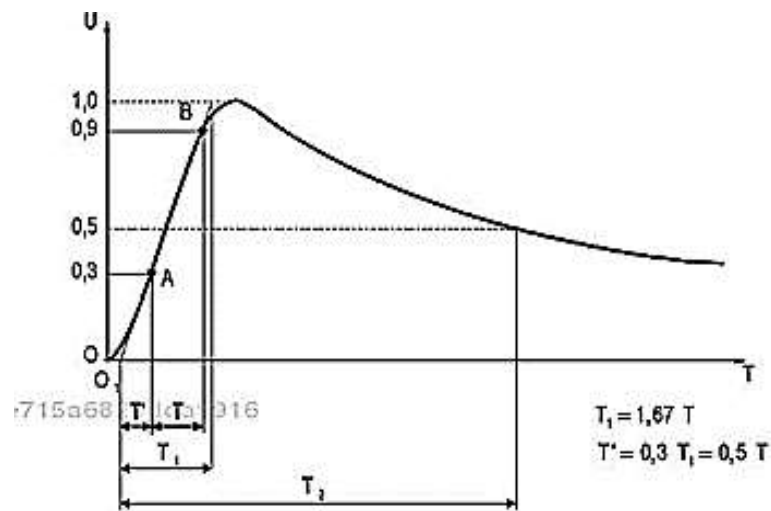
Los disturbios transitorios en los sistemas eléctricos de potencia son ocasionados generalmente por dos tipos de sobretensiones cuyas amplitudes pueden exceder en gran medida el valor de la tensión nominal de operación.

2.4.1. Sobretensiones de origen externo (por descargas atmosféricas).

Se originan por el impacto de rayos sobre las líneas de transmisión, las torres de transmisión, elementos o equipos de subestaciones a la intemperie (descargas directas). Se las denomina también sobretensiones atmosféricas a los análisis o pruebas para este tipo de fenómenos. Hoy en día se encuentran estandarizados por entidades internacionales como la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional), la cual define a

la sobretensión por descarga atmosférica en tramos de duración en frente-cola para formar así una forma normalizada de onda para este fenómeno. El tiempo de frente de onda del impulso de tensión tipo rayo está definido por $T_1 = 1.67T$, donde T es el tiempo que transcurre ente el 30% y el 90% de su valor máximo y T_2 es el 50% del pico máximo de la sobretensión. Así mismo la Comisión Electrotécnica Internacional define los tiempos de acción de T_1 y T_2 de la sobretensión tipo rayo como $1.2/50 \mu s.$, ver Fig. 3.

FIGURA 3: FORMA DE ONDA NORMALIZADA TIPO RAYO.



(TORRESI, 2004)

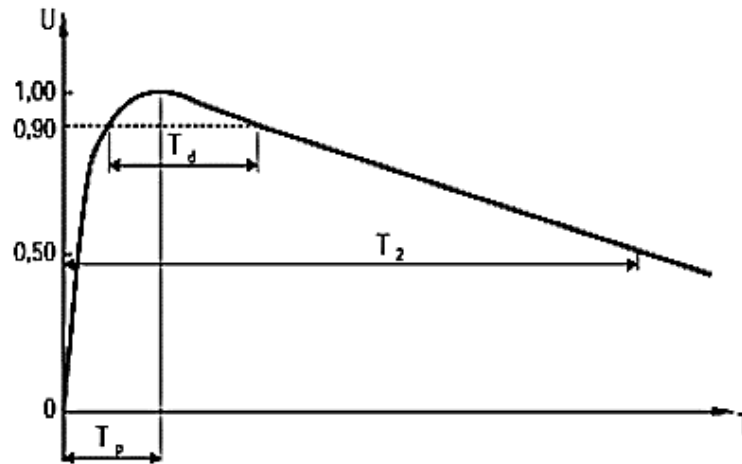
2.4.2. Sobretensiones de origen interno (por maniobra de interruptores).

Son las que se producen al variar las propias condiciones del servicio del sistema. A este grupo pertenecen las oscilaciones de la intensidad de corriente, las variaciones de carga, las descargas a tierra etc. En todos los procesos, la energía acumulada en los elementos inductivos y capacitivos, que componen los circuitos de una instalación, pueden llegar a descargar de tal modo que origina aumentos de tensión perjudiciales. Esta clase de sobretensiones comprende las sobretensiones temporarias y las sobretensiones de maniobra. (Torresi, 2003).

A su vez, la IEC se enfoca en la sobretensión por maniobra en el punto máximo de la sobretensión, la comisión define para este fenómeno que el tiempo T_1 es el valor desde el punto de origen al punto máximo de la sobretensión T_p , y T_2 es el tiempo transcurrido desde el origen de la sobretensión hasta que decae el 50% de su valor

máximo, definiendo la IEC tiempos de 250/2500 μs con tolerancias desde el 20% - 60% respectivamente, ver Fig. 4.

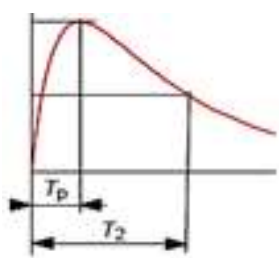
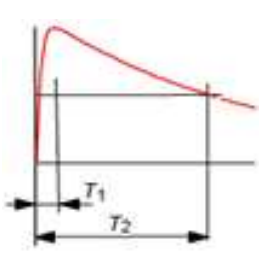
FIGURA 4: FORMA DE ONDA NORMALIZADA TIPO MANIOBRA.



(TORRESI, 2004)

Por lo revisado anteriormente la normativa IEC 60071-1 establece una tabla con las más usuales e importantes sobretensiones:

TABLA 1: FORMA NORMALIZADA DE LA SOBRETENSIÓN.

CLASE	De frente lento	De frente rápido
Forma de tensión		
Rango de formas de tensión.	$5\ 000\ \mu\text{s} \geq T_p > 20\ \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20\ \text{ms}$	$20\ \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1\ \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300\ \mu\text{s}$
Forma normalizada de tensión.	$T_p = 250\ \mu\text{s}$ $T_2 = 2\ 500\ \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2\ \mu\text{s}$ $T_2 = 50\ \mu\text{s}$
Ensayo de tensión soportada normalizada	Ensayo de impulsos tipo maniobra	Ensayo de impulsos tipo rayo

(NORMA IEC 60071-1, EDICIÓN 1993-11)


2.5. Sobretensiones tipo maniobra.

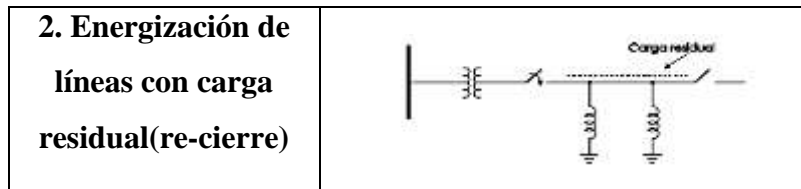
Las sobretensiones que se han analizado anteriormente están asociadas casi siempre a las operaciones de maniobra (se abre o se cierra un interruptor); por ejemplo, una falla monofásica a tierra iniciada por una descarga atmosférica, rechazo de carga, resonancia armónica, etc.

Estas sobretensiones son de tipo interno al sistema al igual que las temporales, solamente que esta sobretensión es directamente proporcional al voltaje del sistema, en cuanto a las causadas por rayo permanecen más o menos constantes. Además tienen, por lo general, alto amortiguamiento y corta duración. La onda normalizada para este tipo de sobretensión es de 250/2500 μ s, según la IEC en su publicación 60-2 del año 1973. (Torresi, 2004).

A continuación se puede ver las operaciones de maniobra más comunes, que pueden ocasionar un nivel de sobretensión elevado al momento de realizarse la maniobra en un interruptor de potencia ya sea de conexión, desconexión o la transición abierto-cerrado. En la posición de cerrado el interruptor de potencia debe conducir una cantidad de corriente sin exceder el valor total estandarizado por el conductor y la estructura del aislante, mientras está cerrado, el sistema está completamente aislado y es continuamente resaltado por una frecuencia de voltaje sinusoidal, y también por sobre-voltajes causados por un rayo, los cambiadores y sistemas de cambio; si el dispositivo está en posición abierto, el aislante que cruza por los contactos acentúa la condición del aislamiento adherido al aislante de tierra, algunas ondas de voltajes transitorios pueden producir incrementos en los voltajes acentuados al lado del dispositivo. (Ramírez, 2008).

TABLA 2: MANIOBRAS QUE PUEDEN CAUSAR SOBRETENSIONES EN EL SISTEMA.

Operación de Maniobra	Diagrama Básico
1. Energización de Líneas	

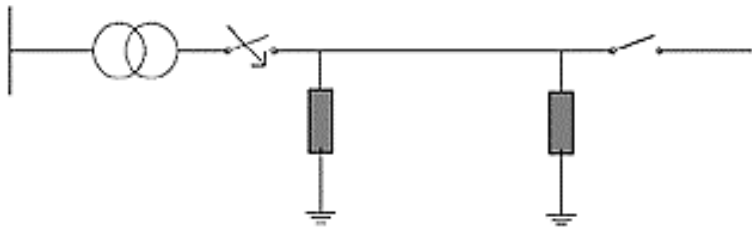


(RAMIREZ, 2008)

2.5.1. Energización o cierres de líneas.

Entre las operaciones de maniobra que pueden ocasionar un nivel de sobretensión elevada están las operaciones de apertura o cierre, ver Fig. 5. Observaremos los de cierre como lo son: Energización de una línea y re-cierre de una línea. Ante la energización o re-cierre de líneas trifásicas, es muy probable la generación de sobretensiones en las tres fases de la línea. Así, cada cierre o re-cierre produce tres sobretensiones fase-tierra y por lo tanto tres sobretensiones entre fases. (Ramírez, 2008).

FIGURA 5: ENERGIZACIÓN O CIERRE DE LÍNEA.

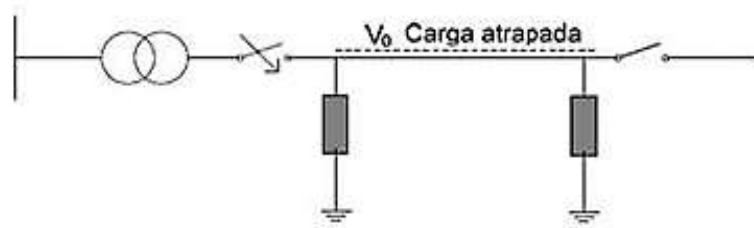


(RAMIREZ, 2008)

Cuando la energización o cierre de una línea de transmisión está en vacío, se nota que las sobretensiones son producidas por la gran diferencia de polos de cierre del disyuntor así que no se genera la coordinación del cierre en sus contactos, luego de obtener el cierre de la primera fase se generan ondas de tensión en las otras dos fases, ya que ésta se acopla dando a que las ondas se desplacen por todo lo largo de la línea hasta llegar al otro extremo y al chocar con la impedancia del circuito abierto donde esta se sobrepone en las ondas que siguen propagándose, generando las altas tensiones.

2.5.2. Re-cierre de líneas.

FIGURA 6: RE-CIERRE DE UNA LÍNEA.



(RAMIREZ, 2008)

El re-cierre de una línea de transmisión tiene por objeto despejar fallas transitorias, y por lo tanto tiene involucrado los procesos de apertura y cierre de los interruptores de potencia (disyuntores de línea), ver Fig. 6. Considerando el caso de que el interruptor de potencia tenga que desconectar una línea en vacío, debido a la naturaleza capacitiva del circuito al momento de interrumpir la corriente por su paso por cero, la tensión estará pasando por su valor máximo, lo cual provoca que las tres fases queden con una tensión aproximadamente igual al valor pico de la tensión fase-tierra de la fuente de alimentación. Por consiguiente, como producto de esta maniobra se genera la denominada “carga atrapada“, que permanecerá en la línea por largos períodos de tiempo, en el orden de minutos, a no ser que sea drenada por medio de reactores o transformadores de potencial inductivos. Posterior a la apertura se ejecuta el re-cierre, que es en donde se pueden generar altas sobretensiones. Esto ocurre como producto de la gran diferencia de potencial que se puede generar en caso de que el re-cierre ocurra antes de haber drenado la carga residual o si los polos del disyuntor cierran cuando la tensión del sistema tenga polaridad opuesta a la de la línea.

2.6. Fundamentos de la generación de voltaje de impulso.

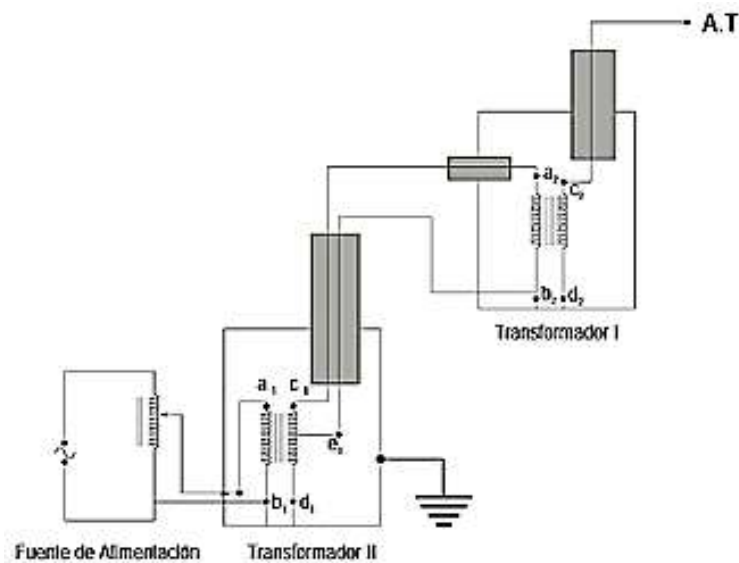
2.6.1. Generación de altas tensiones.

Los transformadores de potencia y frecuencia industrial de dos arrollamientos son los más utilizados en los laboratorios de alta tensión. El diseño de los transformadores para ensayo se efectúa normalmente para la misma frecuencia que la de los objetos a ensayar. Las consideraciones de orden térmico de relación, de regulación y potencia de salida no definen demasiado con respecto a los transformadores de potencia. La

aislación del transformador debe estar capacitada para soportar las sobretensiones a que pueda ser sometido.

El transformador de ensayo de una sola unidad puede ser usado hasta tensiones no superiores a 750 KV en casos especiales hasta 1000 KV. El costo de estas unidades se incrementa muy rápidamente con la tensión. Además las dificultades de transporte e instalación se hacen muy severas.

FIGURA 7: TRANSFORMADORES EN CASCADA.



(TORRESI, 2004)

La tensión de salida se controla regulando la tensión primaria del primer transformador, el cual es normalmente alimentado a través de un autotransformador de regulación de tensión, ver Fig. 7. Las características requeridas para un transformador de ensayo dependen de los elementos a ser probados. Para ensayos de grandes transformadores y generadores que presentan una capacidad electrostática elevada, el transformador de prueba debe suministrar una elevada corriente con buena regulación.

2.6.2. Circuito generador de impulso de simple etapa.

Un generador de impulso elemental consiste en un capacitor, el cual es cargado a la tensión requerida y descargado a través de un circuito de constantes concentradas, (ver Fig. 8, 9) las cuales pueden ser ajustadas para obtener la forma de onda requerida. (Torresi, 2004).

FIGURA 8: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO DE SIMPLE ETAPA A.

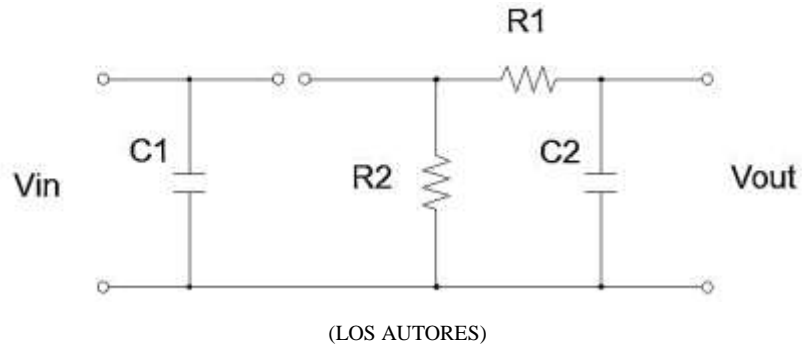
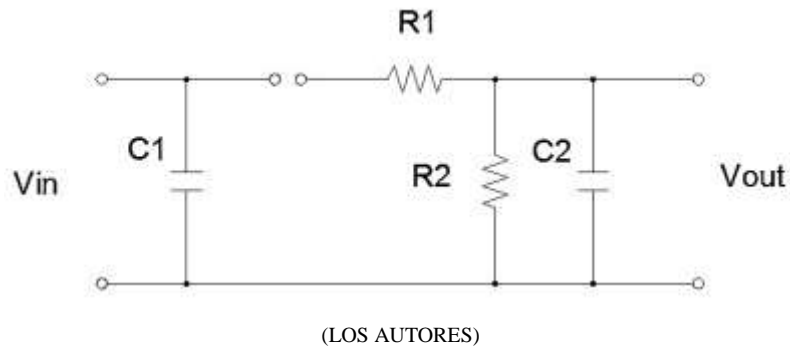


FIGURA 9: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO DE SIMPLE ETAPA B.

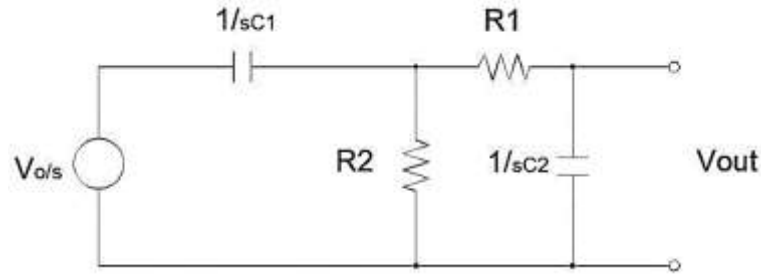


Para el respectivo modelo matemático de la misma es necesario el circuito generador de impulsos de mayor eficiencia, ver Fig. 10; se realizará su respectivo análisis para la Transformada de Laplace, el mismo que lo revisamos a continuación.

Donde en los siguientes circuitos la nomenclatura significará:

- VLN = V_0 = Voltaje Inicial de carga.
- C1 = Cs = Capacitor de Impulso.
- R2 = Re = Resistencia de Cola de Onda.
- R1 = Rd = Resistencia de Frente de Onda.
- C2 = Cb = Capacitor de Cola de Onda.
- SG = Espinterómetro de Esferas.
- Vout = V (t) = Voltaje de Salida.

FIGURA 10: MODELO PARA LA TRANSFORMADA DE LAPLACE.



(LOS AUTORES)

En el circuito básico de un generador de impulso de simple etapa decimos que C_1 es el objeto del capacitor cargado a la tensión de descarga del explosor G. Esta tensión es transferida al objeto bajo prueba a través de capacitor C_2 .

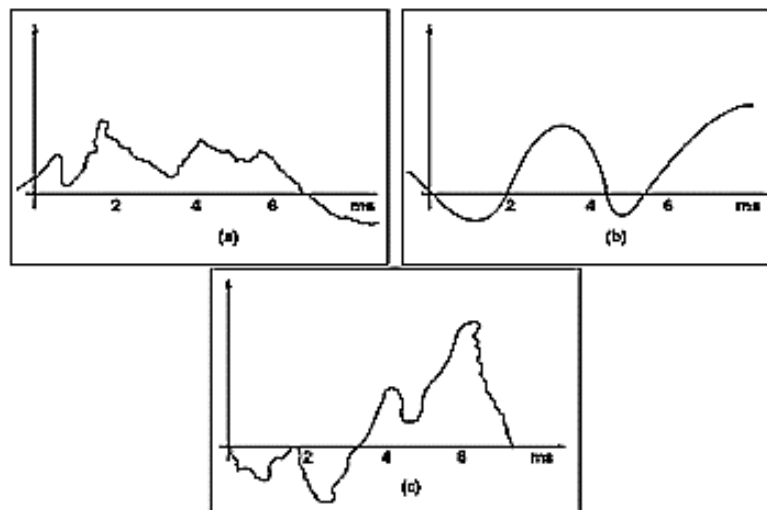
Las resistencias de forma de onda R_1R_2 controlan el tiempo e frente y el tiempo de la onda de impulso obtenida a través de C_1 .

2.6.3. Generación de impulso de maniobra.

Modernamente, los criterios para diseñar la aislación en sistemas de alta tensión son las sobretensiones de maniobra. Estas sobretensiones son definidas como una sobretensión de corta duración acompañando a los cambios de condición en el circuito, como la apertura de un interruptor debido a fallas en el sistema.

Las sobretensiones de maniobra se presentan en un sinnúmero de formas, magnitudes y duraciones correspondientes a una gran variedad de eventos iniciales.

FIGURA 11: TÍPICAS FORMAS DE ONDA DE LAS SUBESTACIONES DE MANIOBRA.



(TORRESI, 2004)

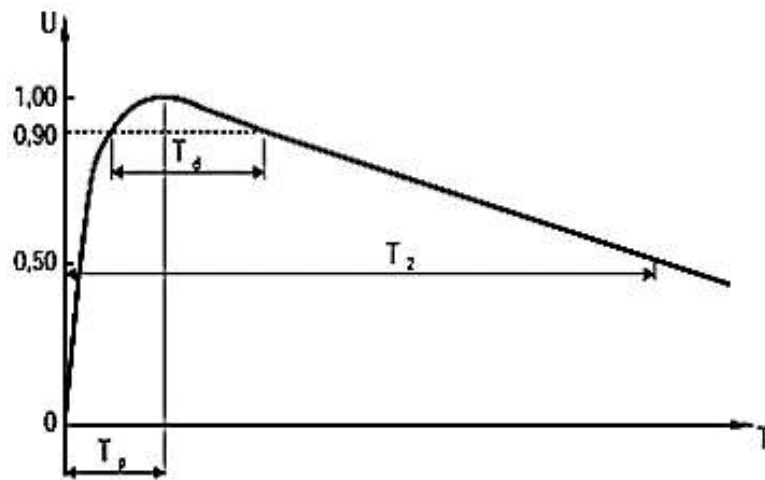
La forma puede ser unipolar, oscilatoria o totalmente irregular y puede estar superpuesta a la frecuencia nominal o a una tensión temporaria, ver Fig. 11.

- Inicio de una falla.
- Extinción de la falla.
- Energización de la línea.

El impulso de maniobra normalizado por las recomendaciones de la Comisión de Electrotécnica Internacional (IEC) tiene un tiempo de frente de 250 μ s y un tiempo de cola de 2500 μ s, con formas alternativas de 100/2500 μ s. la tolerancia en el valor de pico es de $\pm 3\%$, sobre el tiempo de frente de $\pm 20\%$ y sobre el tiempo de cola de $\pm 60\%$, ver Fig. 12.

A su vez este tipo de sobretensión maneja la siguiente onda normalizada de impulso para pruebas de ensayo de equipos supresores de tensiones o simples análisis o estudio del fenómeno de sobretensiones.

FIGURA 12: FORMA DE ONDA DE IMPULSO DE MANIOBRA SEGÚN RECOMENDACIONES DE LA IEC.



(TORRESI, 2004)

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MODELADO MATEMÁTICO

3.1. Recursos utilizados para la generación de impulso.

Para realizar uno de los dos tipos de circuitos de generación de impulso se tiene un inventario de equipos o elementos que se pueden utilizar para la comprobación práctica de los distintos fenómenos que se pueden dar en aspectos eléctricos; a continuación se detallan los equipos utilizados en el laboratorio para las respectivas prácticas y simulaciones de sobretensiones.

- **HV 9103 Control Desk: Escritorio de Control.**

FIGURA 13: ESCRITORIO DE CONTROL.



(LOS AUTORES)

El escritorio de control es usado para control y operación de los equipos para pruebas AC, pruebas DC y pruebas de impulso. Este equipo contiene circuitos de control de señales de los equipos de prueba. También acoge las señales de los equipos de medida ya sea voltímetro AC, voltímetro DC y voltaje de impulso.

Datos técnicos	
Tensión de alimentación:	220V - 230V Monofásico
Capacidad VARIAC:	5KVA Continuamente 10KVA (por corto tiempo, sólo 2 min.)
Frecuencia:	50/60Hz

- **HV 9105 Test transformer: Transformador de prueba.**

FIGURA 14: TRANSFORMADOR DE PRUEBA.



(TERCO, 2006)

El transformador de prueba es el que incrementa el voltaje obtenido del variador de voltaje del escritorio de control y lo transforma en alta tensión, según su relación de transformación 100KV/220V.

Datos técnicos	
Relación de transformación:	2x220/100KV/220V
Capacidad:	5KVA Continuamente 10KVA por 60 minutos
Impedancia por unidad:	4% aproximadamente
Frecuencia:	50/60Hz

- **HV9150 Peak voltmeter: Medidor de voltaje alterno.**

FIGURA 15: MEDIDOR DE VOLTAJE.



(TERCO, 2006)

Medidor de voltaje alterno, para conexión con el capacitor de medida, o con el capacitor de gas comprimido.

Datos técnicos	
Voltaje de alimentación:	220V
Rango de medición: (voltaje eficaz)	0 - 1000 / $\sqrt{2}$ KV

- **HV 9151 DC voltmeter: Medidor de voltaje directo.**

FIGURA 16: MEDIDOR DE VOLTAJE DIRECTO.



(TERCO, 2006)

Medidor de voltaje directo para conexión con la resistencia de medida.

Datos técnicos	
Voltaje de alimentación:	220V
Rango de medición:	0 - 140KV/280KV

- **HV 9152 Impulse Voltmeter: Medidor de voltaje de impulso.**

FIGURA 17: MEDIDOR DE VOLTAJE DE IMPULSO.



(TERCO, 2006)

Medidor de voltaje de impulso pico para conexión con el capacitor de carga.

Datos técnicos	
Voltaje de alimentación:	220V
Rango de medición:	0 - 1000 KV

- **HV 9130 Low voltage divider: Divisor de bajo voltaje.**

FIGURA 18: DIVISOR DE VOLTAJE O CAPACITOR DE ACOPLAMIENTO.



(TERCO, 2006)

El divisor de bajo voltaje incorporado con un capacitor de bajo voltaje y con el cable adaptador de 50Ω . Se conecta en el puerto UHF del capacitor de carga y conectado al medidor de voltaje de impulso para medir por medio de un cable coaxial.

Datos técnicos	
Rango de medición:	0- 150 KV

- **HV9112 Impulse capacitor: Capacitor de impulso.**

FIGURA 19: CAPACITOR DE IMPULSO.



(LOS AUTORES)

Capacitor de impulso para generación de voltajes de impulso. Este también puede ser usado como capacitor de rizado en la generación de voltaje DC.

Datos técnicos	
Capacitancia:	25000pF
Voltaje DC y voltaje de impulso nom.:	140 KV

- **HV9120 Load capacitor: Capacitor de carga.**

FIGURA 20: CAPACITOR DE CARGA.



(LOS AUTORES)

Capacitor de carga para medición de voltaje de impulso junto al divisor de bajo voltaje.

Datos técnicos	
Capacitancia:	1.2nF
Voltaje DC y voltaje de impulso nom.:	140 KV

- **HV9141 Measuring capacitor: Capacitor para medición.**

FIGURA 21: CAPACITOR DE MEDICIÓN.



(TERCO, 2006)

Capacitor para medición provisto de un capacitor divisor de bajo voltaje para la medición de voltajes AC.

Datos técnicos	
Capacitancia:	100pF
Voltaje AC nom.:	100 KV

- **HV9124 Insulating rod: Barra aislante.**

FIGURA 22: BARRA AISLANTE.



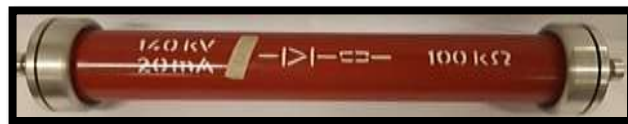
(LOS AUTORES)

Barra aislante para aislar elementos con diferente potencial eléctrico.

Datos técnicos	
Voltaje AC nom.:	100KV
Voltajes DC y voltajes de impulso nom.:	140 KV

- **HV9111 Silicon rectifier: Rectificador de silicio.**

FIGURA 23: RECTIFICADOR DE SILICIO.



(LOS AUTORES)

Rectificador de silicio se usa en pruebas DC y pruebas de impulso como rectificador de media onda.

Datos técnicos	
Voltaje máx.:	140KV
Corriente nominal:	20mA
Resistencia de protección:	100KΩ

- **HV 9121 Charging resistor: Resistencia de carga.**

FIGURA 24: RESISTENCIA DE CARGA.



(LOS AUTORES)

Resistencia de carga para la prueba de voltaje de impulso de varias etapas y también se lo usa como resistencia limitadora de corriente para la generación DC.

Datos técnicos	
Resistencia:	10MΩ
Voltaje de impulso nom.:	140KV

- **HV 9122 Wave front resistor: Resistencia de frente de onda.**

FIGURA 25: RESISTENCIA DE FRENTE DE ONDA.



(LOS AUTORES)

Resistencia de frente de onda para la generación de voltajes de impulso. La resistencia determina el tiempo de subida de la onda de impulso.

Datos técnicos	
Resistencia:	350Ω
Voltaje de impulso nom:	140KV

- **HV 9123 Wave tail resistor: Resistencia de cola de onda.**

FIGURA 26: RESISTENCIA DE COLA DE ONDA.



(LOS AUTORES)

Resistencia de cola de onda para la generación de voltajes de impulso. La resistencia determina el tiempo de medio valor del de la onda de impulso.

Datos técnicos	
Resistencia:	2400Ω
Voltaje de impulso nom.:	140KV

- **HV 9125 Sphere gap: Espinterómetro.**

FIGURA 27: ESPINTERÓMETRO.



(LOS AUTORES)

El mecanismo se usa para la generación de voltajes de impulso pre ajustado al voltaje pico de impulso que se quiera obtener.

Datos técnicos	
Diámetro de esferas:	100mm
Voltaje de impulso nom.:	140KV
Distancia de separación máx. entre esferas:	80mm

- **HV 9126 Drive for sphere gap: Timonel de espinterómetro.**

FIGURA 28: TIMONEL DE ESPINTERÓMETRO.



(TERCO, 2006)

Control a distancia para el espinterómetro para variar la distancia entre los dos explosores.

Datos técnicos	
Voltaje de alimentación:	220V
Frecuencia:	50/60Hz

- **HV 9113 Measuring resistor: Resistencia para medición.**

FIGURA 29: RESISTENCIA PARA MEDICIÓN.



(LOS AUTORES)

Resistencia de alto voltaje para medición de voltaje DC.

Datos técnicos	
Resistencia:	280MΩ
Voltaje DC nom:	140KV
Corriente nominal:	0.5mA

- **HV 9114 Earthing switch, electrically operated: Interruptor a tierra con operación eléctrica.**

FIGURA 30: INTERRUPTOR PUESTA A TIERRA.



(TERCO, 2006)

Interruptor a tierra para una protección automática (descarga a tierra) en el momento que el transformador es des-energizado.

Datos técnicos	
Voltaje DC de servicio:	140KV
Frecuencia:	50/60Hz

- **HV9107 Discharge rod: Barra de descarga.**

FIGURA 31: PÉRTIGA DE DESCARGA.



(LOS AUTORES)

La barra de descarga se usa para la descarga manual hacia tierra de todos los componentes.

Datos técnicos	
Resistencia de descarga:	100Ω
Longitud:	2.5m

- **HV9109 Connecting cup, aluminium: Copa conectora de aluminio.**

FIGURA 32: COPA CONECTORA.



(LOS AUTORES)

La copa conectora es un elemento conductor que se utiliza como nodo para conexión entre los elementos.

Datos técnicos	
Diámetro:	150mm
Peso:	2.2Kg

- **HV9110 Floor pedestal, aluminium: Base pedestal de piso de aluminio.**

FIGURA 33: BASE PEDESTAL.



(LOS AUTORES)

La base para piso es un elemento conductor en el cual se montan los elementos y se realiza la conexión inferior a tierra, para que un extremo de un equipo tenga el mismo potencial de la tierra del circuito.

Datos técnicos	
Diámetro:	200mm
Peso:	2Kg

- **HV9108 Connecting rod, aluminium: Barra conectora de aluminio.**

FIGURA 34: CONECTOR DE ALUMINIO.



(LOS AUTORES)

La barra conectora se usa como cable conductor, entre elementos a distancias de 1 m aproximadamente.

Datos técnicos	
Longitud:	665mm
Peso:	1Kg

- **HV9119 Spacer tube, aluminium: Tubo conector de aluminio.**

FIGURA 35: CONECTOR DE BASE DE ALUMINIO.



(LOS AUTORES)

El tubo conector tiene como finalidad tener una conexión mecánica y eléctrica a nivel de tierra cuando se inserta en la base pedestal de piso.

Datos técnicos	
Longitud:	665mm
Peso:	1Kg

- **HV 9134 Vessel for vacuum and pressure: Vasija de vacío y presión.**

FIGURA 36: ESPINTERÓMETRO A VACÍO.



(LOS AUTORES)

La vasija se utiliza para determinar los voltajes de ruptura entre electrodos con arreglos entre vacío y presión necesarios para la prueba. Para diferentes arreglos de electrodos se necesitan otros accesorios.

Datos técnicos	
Voltaje AC nom:	100KV
Voltaje DC y voltaje de impulso nom:	140KV
Presión de operación:	0- 6 bar

- **HV9133 Measuring spark gap: Espinterómetro para medición.**

FIGURA 37: ESPINTERÓMETRO PARA MEDICIÓN.



(LOS AUTORES)

El espinterómetro para medición es un dispositivo de medición de voltajes de ruptura en el cual se pueden usar varios arreglos de electrodos.

Datos técnicos	
Voltaje AC nom:	100KV (rms)
Voltaje DC y voltaje de impulso nom:	140KV
Voltaje de alimentación:	220-240V

- **HV9137 Oil testing cup: Copa para pruebas de aislantes líquidos.**

FIGURA 38: RECIPIENTE PARA PRUEBAS DE ACEITE AISLANTE.



(LOS AUTORES)

La copa para pruebas en aceite es usada para la medición de voltaje de ruptura de aislantes líquidos. Se debe hacer la medición con una distancia ajustada de 2 mm o 2.5 mm según la norma que se utilice.

3.2. Elementos importantes a ser tomados en cuenta.

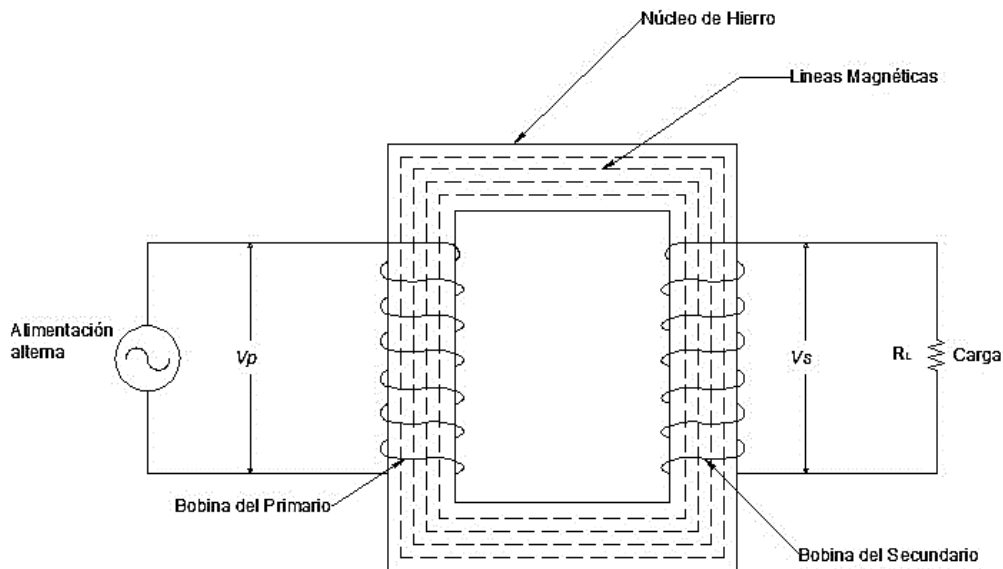
Ciertos elementos deben de ser tomados en cuenta de una forma más minuciosa, ya que por su importancia deben tener un estudio o una revisión más detallada. En el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana se cuenta con elementos muy importantes para la generación de impulsos; ya que sin estos, no se podría realizar ningún tipo de simulaciones o procesos experimentales. A continuación se detallan los elementos más importantes para la generación de impulso y su función específica.

3.2.1. Transformador.

El transformador básico consiste en dos bobinas eléctricamente aisladas y enrolladas sobre un núcleo común, ver Fig. 39. La energía eléctrica se transfiere en una bobina a otra por medio del acoplamiento magnético. La bobina que recibe la energía de la fuente de C.A se llama (devanado) primario. La que proporciona energía de una carga de C.A se llama (devanado) secundario. El núcleo de los transformadores que se usan a bajas frecuencias se hace con un material magnético, usualmente acero laminado. Los núcleos de los transformadores que se usan en frecuencias altas se hacen de hierro pulverizado y cerámica o bien de materiales no magnéticos. Algunas bobinas se arrollan sencillamente sobre formas huecas no magnéticas (por ejemplo, de cartón o de plástico), de manera que el material del núcleo sea en realidad el aire.

Si se supone que un transformador opera en condiciones ideales, la transferencia de energía de un voltaje hacia otro, no va acompañada por pérdidas.

FIGURA 39: DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UN TRANSFORMADOR.



(GUSSOW, 2004)

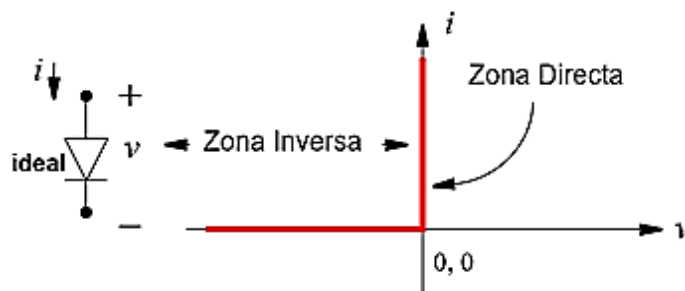
Por ende el transformador es una máquina que no tiene partes en movimiento. El transformador permite transformar la potencia eléctrica que recibe a un determinado nivel de tensión e intensidad, en prácticamente la misma potencia pero con otro nivel de tensión modificando la intensidad de corriente en proporción inversa a la tensión. (Gussow, 2004).

3.2.2. Diodo rectificador.

El diodo rectificador común de estado sólido se hace de silicio y opera actuando como una compuerta, la cual permite que la corriente fluya en un solo sentido pero no en el otro. La polarización del voltaje aplicado en un diodo determina en todo casi si a través del diodo fluirá o no corriente. Las dos polaridades de un voltaje aplicado se conocen como polarización directa o de avance y polarización inversa. (Buban & Marshall L., 1983).

La llamada curva característica, representa la corriente que circula por un diodo ideal, en función de la tensión entre sus extremos, ver Fig. 40. Cualquiera sea la tensión inversa que se le aplique, el diodo ideal no conduce, y la corriente es entonces nula. El diodo se comporta, para las tensiones de polaridad opuesta a la de conducción, como un cable cortado. (Rela, 2010).

FIGURA 40: CURVA CARACTERÍSTICA DE UN DIODO IDEAL.



(RELA, 2010)

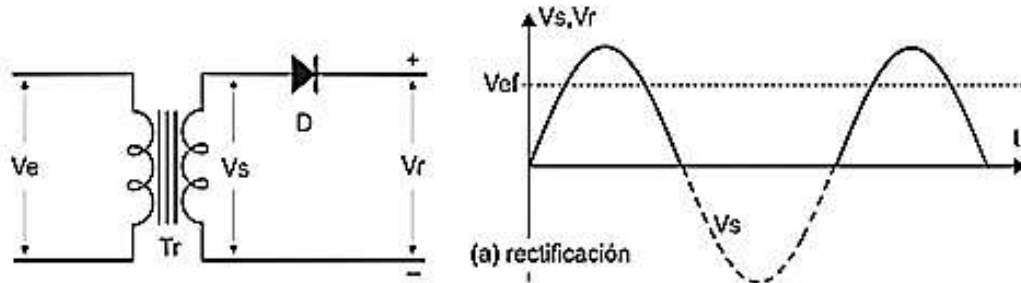
3.2.3. Circuito rectificador de media onda.

Cuando un diodo se conecta a una fuente de voltaje alterno, alternativamente se polariza directa e inversamente durante cada ciclo. Por lo tanto, cuando se usa solo un diodo en un circuito rectificador, la corriente circula a través de la carga del circuito únicamente durante un semiciclo de voltaje de entrada. Por esta razón el circuito se denomina rectificador de media onda, ver Fig. 41. (Buban & Marshall L., 1983).

La intercalación de un diodo en serie alcanza para que una tensión alterna, formada por semi-ciclos de las dos polaridades, resulte en una tensión de una única polaridad,

aunque eso no alcance para calificarla de continua (una tensión continua debería ser aproximadamente constante, en condiciones fijas de uso). (Rela, 2010).

FIGURA 41: RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA.



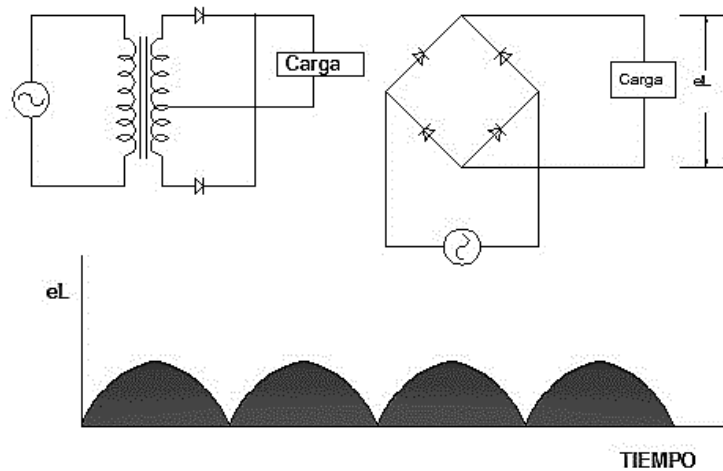
(RELA, 2010)

3.2.4. Rectificador de onda completa.

Un circuito rectificador de onda completa rectifica el ciclo completo de un voltaje aplicado, ver Fig. 42. El circuito rectificador de onda completa básico utiliza dos diodos. La acción de estos durante cada medio ciclo del voltaje aplicado los rectificadores de onda completa presenta un voltaje de salida más alisado que los rectificadores de media onda. Ello se debe a que el perímetro produce un pulso de voltaje en la salida del circuito durante cada semi-ciclo de voltaje aplicado. Después del filtrado de la corriente de carga puede ser totalmente lisa. (Buban & Marshall L., 1983).

Para aprovechar los dos semi-ciclos, se pueden usar cuatro diodos, que en esa aplicación constituyen un rectificador de onda completa de puente de diodos. (Rela, 2010).

FIGURA 42: PUENTE RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA.



(RELA, 2010)

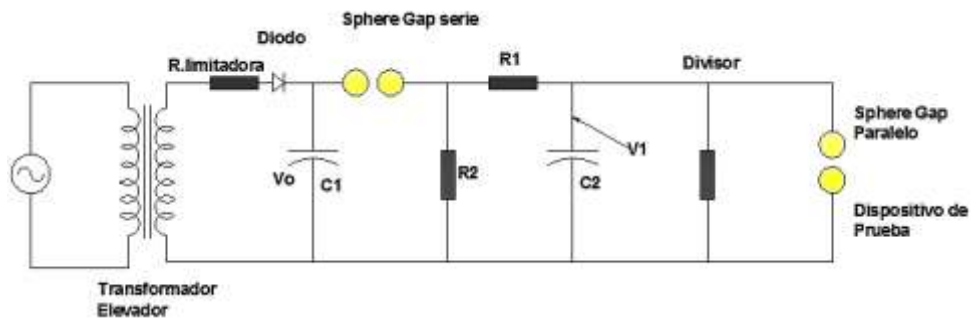
3.2.5. Voltímetro de esferas.

En el campo de las altas tensiones a frecuencia industrial, a impulso y a corriente continua se recurre al voltímetro de esferas, explosor a esferas o espinterómetro.

Se define como espinterómetro un dispositivo construido por dos esferas de igual diámetro en aire, ver Fig. 43, sostenidas por las partes metálicas, con eje vertical u horizontal, ajustables de manera de poder igualar con facilidad la distancia entre esferas.

La medición de tensión obtenida por medio de estos aparatos está referidas al valor de cresta y a la distancia entre esferas normalmente definidas como distancia explosiva. No existe una relación lineal entre distancia explosiva y tensión de descarga. Los valores de tensión de descarga para cada distancia explosiva y diámetro normalizado de las esferas. Básicamente la conexión de uso normal es una esfera aislada y conectada a tierra. (Torresi, 2004).

FIGURA 43: EXPLOSOR A ESFERAS O ESPINTERÓMETRO VERTICAL.



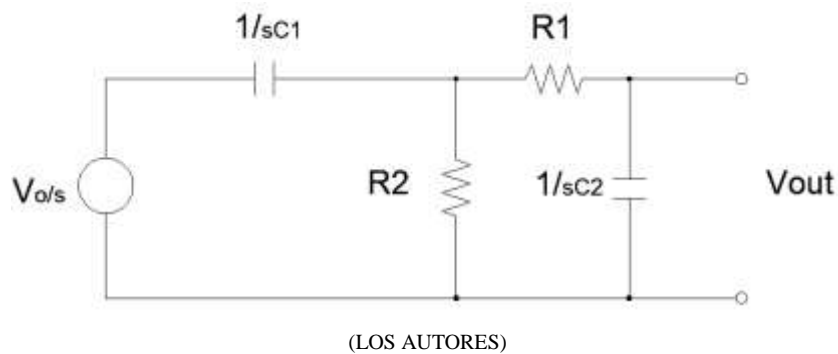
(TORRESI, 2003)

3.3. Modelado matemático.

3.3.1. Cálculo de resistencias de 55 K Ω y 118 K Ω .

Tomando como punto de partida el análisis del circuito generador de impulso, obtenemos las ecuaciones iniciales del circuito para realizar el modelado matemático y su respectiva simulación que permita obtener de manera gráfica el fenómeno que está ocurriendo en una sobretensión. Para ello se simula, no sin antes realizar la programación con los datos obtenidos del modelado matemático; para así, tener una gráfica o el espectro de onda de la sobretensión para posterior ser comparada con la tabulación de resultados obtenidos en laboratorio.

FIGURA 44: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO DE UNA ETAPA POR LAPLACE.



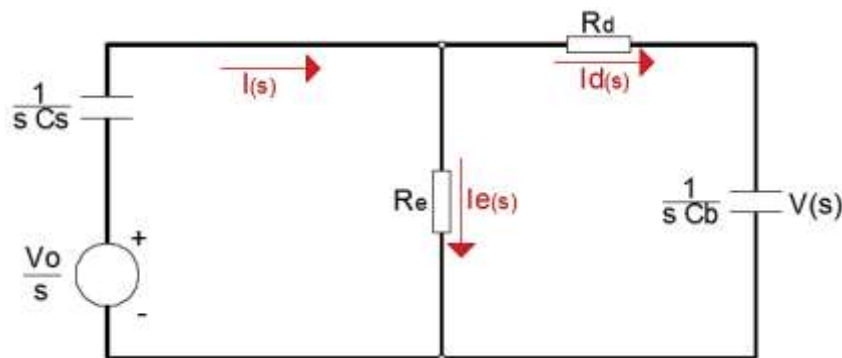
Donde:

V_0	=	Voltaje Inicial de carga.		
SG	=	Espinterómetro de Esferas.		
C_1	=	C_s	=	Capacitor de Impulso.
R_2	=	R_e	=	Resistencia de Cola de Onda.
R_1	=	R_d	=	Resistencia de Frente de Onda.
C_2	=	C_b	=	Capacitor de Cola de Onda.
V_{out}	=	$V(t)$	=	Voltaje de Salida.

En el circuito de generación de impulso ocurre que, el capacitor de impulso (C_s) se carga mediante la fuente de voltaje DC, cuando este capacitor alcanza el voltaje nominal de la fuente V_0 , pasa a ser la fuente del circuito contiguo. A su vez el voltaje

de descarga V_0 está siendo controlado por la separación de las esferas en el espinterómetro, creando un arco eléctrico y así rompiendo la rigidez dieléctrica del aire y la distancia de las esferas. Creando en ese instante un camino por donde la corriente fluye a la resistencia de frente de Onda (R_d), que tiene como objetivo controlar o limitar el tiempo del frente de onda (instante en el que alcanza el pico máximo de voltaje llamado T_p). En el mismo instante se está cargando el capacitor de cola de onda (C_b), cuando se encuentran cargados los capacitores C_b y C_s y han alcanzado la misma cantidad de voltaje y proceden a descargarse con la resistencia de cola de onda (R_e); dicha resistencia tiene como objetivo controlar el tiempo de descarga desde el punto máximo del impulso hasta el nivel estable, proceso de descarga que tiene como tiempo (t) de duración mucho más prolongado que el frente de onda, debido al valor considerable de resistencia de frente (R_d). Para poder analizar dicho circuito es necesario aplicar la transformada de Laplace y así analizar un circuito en el dominio de la frecuencia como punto de partida para el análisis de cada una de las ecuaciones de origen del modelo matemático, ver Fig. 45.

FIGURA 45: CIRCUITO ANALIZADO CON LA TRANSFORMADA DE LAPLACE



(LOS AUTORES)

ECUACIÓN 2: LEY DE VOLTAJE DE KIRCHHOFF.

$$\sum_n V_n = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots + V_n = 0$$

(BUBAN & MARSHALL L., 1983)

ECUACIÓN 3: LEY DE CORRIENTE DE KIRCHHOFF.

$$\sum_{k=1}^n I_k = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$$

(BUBAN & MARSHALL L., 1983)

Aplicaremos las leyes de Kirchhoff y la Ley de Ohm.

$$\frac{V_0}{s} = i(s) \cdot \frac{1}{s \cdot C_s} + ie(s) \cdot R_e \quad (\text{Ec. 1})$$

$$ie(s) \cdot R_e = id(s) \cdot R_d + V(s) \quad (\text{Ec. 2})$$

$$i(s) = ie(s) + id(s) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$V(s) = id(s) \cdot \frac{1}{s \cdot C_b} \quad (\text{Ec. 4})$$

Como punto de partida, se despeja la corriente $id(s)$ de la **Ec. (4)**

$$V(s) \cdot sC_b = id(s)$$

Reemplazamos $i(s)$ en la **Ec. (1)** por su equivalente en la **Ec. (3)**

$$\frac{V_0}{s} = [ie(s) + id(s)] \cdot \frac{1}{s \cdot C_s} + ie(s) \cdot R_e$$

Reemplazamos $id(s)$ por su equivalente obtenido anteriormente.

$$\frac{V_0}{s} = [ie(s) + V(s) \cdot s \cdot C_b] \cdot \frac{1}{s \cdot C_s} + ie(s) \cdot R_e$$

Simplificamos y despejamos $ie(s)$

$$\frac{V_0}{s} = \frac{1}{s \cdot C_s} \cdot ie(s) + \frac{s \cdot C_b}{s \cdot C_s} \cdot V(s) + ie(s) \cdot R_e$$

$$\frac{V_0}{s} = ie(s) \left[\frac{1}{s \cdot C_s} + R_e \right] + \frac{C_b}{C_s} \cdot V(s)$$

$$ie(s) = \frac{\frac{V_0}{s} - \frac{C_b}{C_s} \cdot V(s)}{\frac{1}{s \cdot C_s} + R_e}$$

$$ie(s) = \frac{\frac{C_s \cdot V_0 - s \cdot C_b \cdot V(s)}{s \cdot C_s}}{\frac{1 + s \cdot R_e \cdot C_s}{s \cdot C_s}}$$

$$ie(s) = \frac{C_s \cdot V_0 - s \cdot C_b \cdot V(s)}{1 + s \cdot R_e \cdot C_s} \quad (\text{Ec. 5})$$

En la **Ec. (2)** también se reemplazara $id(s)$ por su semejante obtenido anteriormente.

$$ie(s) = \frac{s C_b \cdot R_d \cdot V(s)}{R_e} + \frac{V(s)}{R_e}$$

$$ie(s) = \frac{V(s)}{R_e} [s \cdot C_b \cdot R_d + 1] \quad (\text{Ec. 6})$$

Iguamos las **Ec. (5)** y **Ec. (6)** despejamos el voltaje de salida $V(s)$

$$\frac{C_s \cdot V_0 - s \cdot C_b \cdot V(s)}{1 + s \cdot R_e \cdot C_s} = \frac{V(s)}{R_e} [s \cdot C_b \cdot R_d + 1]$$

$$\frac{C_s \cdot V_0}{1 + s \cdot R_e \cdot C_s} - \frac{s \cdot C_b \cdot V(s)}{1 + s \cdot R_e \cdot C_s} = \frac{V(s)}{R_e} [s \cdot C_b \cdot R_d + 1]$$

$$\frac{C_s \cdot V_0}{1 + s \cdot R_e \cdot C_s} = \frac{V(s)}{R_e} [s \cdot C_b \cdot R_d + 1] + \frac{s \cdot C_b \cdot V(s)}{1 + s \cdot R_e \cdot C_s}$$

$$\frac{C_s \cdot V_0}{1 + s \cdot R_e \cdot C_s} = \frac{V(s) [1 + s \cdot C_b \cdot R_d] [1 + s \cdot R_e \cdot C_s] + s \cdot R_e \cdot C_b \cdot V(s)}{R_e (1 + s \cdot R_e \cdot C_s)}$$

$$\frac{C_s \cdot V_0}{1 + s \cdot R_e \cdot C_s} = \frac{V(s) \{ [1 + s \cdot C_b \cdot R_d] [1 + s \cdot R_e \cdot C_s] + s \cdot R_e \cdot C_b \}}{R_e (1 + s \cdot R_e \cdot C_s)}$$

$$V(s) = \frac{R_e (1 + s \cdot R_e \cdot C_s) \cdot C_s \cdot V_0}{\{[1 + s \cdot C_b \cdot R_d] [1 + s \cdot R_e \cdot C_s] + s \cdot R_e \cdot C_b\} [1 + s \cdot R_e \cdot C_s]}$$

$$V(s) = \frac{R_e \cdot C_s \cdot V_0}{\{1 + s \cdot C_b \cdot R_d + s \cdot R_e \cdot C_s + s^2 \cdot R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b + s \cdot R_e \cdot C_b\}}$$

$$V(s) = \frac{R_e \cdot C_s \cdot V_0}{R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b \cdot s^2 + (R_d \cdot C_b + R_e \cdot C_s + R_e \cdot C_b)s + 1}$$

Dividimos el denominador para $R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b$ para obtener una ecuación de la forma $s^2 + b_s + c$.

$$V(s) = \frac{\frac{R_e \cdot C_s \cdot V_0}{R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b}}{\frac{R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b}{R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b} \cdot s^2 + \frac{(R_e \cdot C_b + R_e \cdot C_s + R_e \cdot C_b)}{R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b} \cdot s + \frac{1}{R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b}}$$

$$V(s) = \frac{\frac{V_0}{R_d \cdot C_b}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_e \cdot C_s} + \frac{1}{R_d \cdot C_b} + \frac{1}{R_d \cdot C_s}\right) \cdot s + \frac{1}{R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b}} \quad (\text{Ec. 7})$$

Este es el voltaje de salida $V(s)$ sobre el capacitor C_b expresado en dominio de la frecuencia, ahora se debe aplicar la anti-transformada de Laplace para obtener el resultado en dominio del tiempo, pero antes debemos obtener las raíces de la ecuación cuadrática del denominador.

$$s^2 + \left(\frac{1}{R_e \cdot C_s} + \frac{1}{R_d \cdot C_b} + \frac{1}{R_d \cdot C_s}\right) \cdot s + \frac{1}{R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b} = 0$$

Para obtener las raíces utilizaremos la ecuación general.

$$\alpha, \beta = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\alpha, \beta = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4c}}{2}$$

$$\alpha, \beta = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 \cdot \left(1 - \frac{4c}{b^2}\right)}}{2}$$

$$\alpha, \beta = -\frac{b}{2} \pm \frac{\sqrt{1 - \frac{4c}{b^2}}}{2}$$

$$\alpha, \beta = \frac{b}{2} \left(-1 \pm \sqrt{1 - \frac{4c}{b^2}} \right)$$

Donde,

$$a = 1$$

$$b = \left(\frac{1}{R_e \cdot C_s} + \frac{1}{R_d \cdot C_b} + \frac{1}{R_d \cdot C_s} \right)$$

$$c = \frac{1}{R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b}$$

Resolvemos las ecuaciones y encontramos α y β

$$\alpha = \frac{b}{2} \left(-1 + \sqrt{1 - \frac{4c}{b^2}} \right)$$

$$\alpha = \frac{\left(\frac{1}{R_e \cdot C_s} + \frac{1}{R_d \cdot C_b} + \frac{1}{R_d \cdot C_s} \right)}{2} \cdot \left(-1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot \frac{1}{R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b}}{\left(\frac{1}{R_e \cdot C_s} + \frac{1}{R_d \cdot C_b} + \frac{1}{R_d \cdot C_s} \right)^2}} \right) \quad \text{(Ec. 8)}$$

$$\beta = \frac{b}{2} \left(-1 - \sqrt{1 - \frac{4c}{b^2}} \right)$$

$$\beta = \frac{\left(\frac{1}{R_e \cdot C_s} + \frac{1}{R_d \cdot C_b} + \frac{1}{R_d \cdot C_s}\right)}{2} \cdot \left(-1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot \frac{1}{R_e \cdot R_d \cdot C_s \cdot C_b}}{\left(\frac{1}{R_e \cdot C_s} + \frac{1}{R_d \cdot C_b} + \frac{1}{R_d \cdot C_s}\right)^2}}\right) \quad (\text{Ec. 9})$$

También se puede escribir la **Ec. (7)** de la siguiente manera.

$$V_{(s)} = \frac{V_0}{R_d \cdot C_b} \cdot \frac{1}{(s + \alpha)(s + \beta)}$$

Aplicamos el método de las fracciones parciales para descomponer la expresión.

$$V_{(s)} = \frac{V_0}{R_d \cdot C_b} \cdot \frac{1}{(s + \alpha)(s + \beta)} = \frac{A}{(s + \alpha)} + \frac{A}{(s + \beta)}$$

$$\frac{V_0}{R_d \cdot C_b} = A(s + \beta) + B(s + \alpha)$$

$$A + B = 0$$

$$\beta A + \alpha B = \frac{V_0}{R_d \cdot C_b}$$

$$B = \frac{V_0}{R_d \cdot C_b \cdot (\alpha - \beta)}$$

$$A = -B = -\frac{V_0}{R_d \cdot C_b \cdot (\alpha - \beta)}$$

Teniendo los valores de A y B, reemplazamos.

$$V_{(s)} = \frac{-\frac{V_0}{R_d \cdot C_b \cdot (\alpha - \beta)}}{(s + \alpha)} + \frac{\frac{V_0}{R_d \cdot C_b \cdot (\alpha - \beta)}}{(s + \beta)}$$

La ecuación esta lista para aplicarle la anti-transformada de Laplace.

$$V_{(s)} = \frac{V_0}{R_d \cdot C_b \cdot (\alpha - \beta)} \cdot \left[\frac{1}{(s + \beta)} - \frac{1}{(s + \alpha)} \right]$$

Aplicando la anti-transformada de Laplace, tenemos.

$$V_{(t)} = \frac{V_0}{(R_d \cdot C_b)} \cdot \frac{1}{(\alpha - \beta)} \cdot [e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}] \quad (\text{Ec. 10})$$

Se pueden obtener los valores de α y β por un método que da una aproximación bastante cercana siempre y cuando los parámetros resistivos y capacitivos del circuito sean constantes, entonces se pueden analizar separadamente en dos circuitos, primero analicemos el circuito de frente, ver Fig. 46.

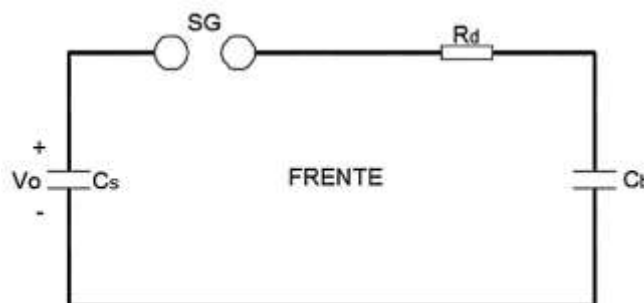
Para el dimensionamiento de las resistencias, el trabajo es encontrar los valores de R_1 y R_2 , teniendo en cuenta que el capacitor de frente y el capacitor de cola son previamente conocidos; para ello, es necesario tener las constantes de tiempo de la carga del capacitor de frente y la constante de tiempo de descarga del capacitor de cola, como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 3: CONSTANTES PARA EL CÁLCULO DEL GENERADOR.

T_1/T_2 (μs)	T_{cr}/T_2 (μs)	$1/\alpha_1$ (μs)	$1/\alpha_2$ (μs)
1.2/50	3.48	0.8
1.2/50	68.2	0.405
1.2/200	284	0.381
250/2500	2877	104
.....	250/2500	3155	62.5

(CARRAZCO, 2005)

FIGURA 46: ANÁLISIS DE FRENTE DE ONDA PARA TIEMPO T1.



(LOS AUTORES)

Considerando el circuito de frente de onda en el momento en que ocurre la descarga entre las esferas de espinterómetro SG, el condensador C_b se carga con la constante de tiempo t_1 :

$$-\frac{1}{\beta} = t_1 = R_d \cdot \left(\frac{C_s \cdot C_b}{C_s + C_b} \right) \quad (\text{Ec. 11})$$

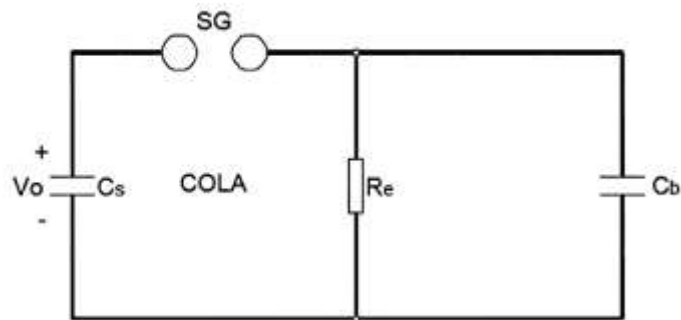
Definida como el producto de la resistencia de frente R_d con la capacidad equivalente serie de los dos condensadores C_s y C_b . Generalmente, se asume que $C_s \gg C_b$ por lo que la relación se puede simplificar a:

$$t_1 \cong R_d \cdot C_b \quad (\text{Ec. 12})$$

Que indica que la duración del frente de la onda de tensión en el condensador C_b , es directamente proporcional a la resistencia de frente R_d , y a la capacidad del objeto de prueba C_b .

Haciendo un proceso análogo en el circuito de cola, ver Fig. 47:

FIGURA 47: ANÁLISIS DE COLA DE ONDA PARA TIEMPO T2.



(LOS AUTORES)

En el instante en el cual la transferencia de la carga de C_s a C_b es cero (debido a una redistribución de la carga eléctrica entre ambos), los condensadores se descargan en la resistencia R_e , con una constante de tiempo t_2 igual a:

$$-\frac{1}{\alpha} = t_2 = R_e \cdot (C_s + C_b) \quad (\text{Ec. 13})$$

Y simplificando con la suposición $C_s \gg C_b$, se tiene:

$$t_2 \cong R_e \cdot C_s \quad (\text{Ec. 14})$$

- **Resistencia Rd (resistencia de frente de onda).**

Como se muestra en la **Ec. (11)**, despejamos R_d en la ecuación para obtener los valores de la resistencia.

ECUACIÓN 4: RESISTENCIA DE FRENTE DE ONDA.

$$t1 = R_d \left(\frac{C_s \cdot C_b}{C_s + C_b} \right)$$

(LOS AUTORES)

$$\frac{t1}{\left(\frac{C_s \cdot C_b}{C_s + C_b} \right)} = R_d$$

$$\frac{t1 (C_s + C_b)}{C_s \cdot C_b} = R_d$$

$$R_d = \frac{(62.5 * 10^{-6}) [(1.2 * 10^{-9}) + (25 * 10^{-9})]}{(1.2 * 10^{-9}) (25 * 10^{-9})}$$

$$R_d = \frac{(62.5 * 10^{-6}) (2.62 * 10^{-8})}{(3 * 10^{-17})}$$

$$R_d = \frac{(1.6375 * 10^{-12})}{(3 * 10^{-17})} = 54583.3333 (\Omega) = \mathbf{54,583333 (K\Omega)}$$

- **Resistencia Re (resistencia de cola de onda).**

Como se muestra en la **Ec. (13)**, despejamos R_e en la ecuación para obtener los valores de la resistencia.

ECUACIÓN 5: RESISTENCIA DE COLA DE ONDA.

$$t_2 = R_e (C_s + C_b)$$

(LOS AUTORES)

$$R_e = \frac{t_2}{(C_s + C_b)}$$

$$R_e = \frac{3155 * 10^{-6}}{(1.2 * 10^{-9}) + (25 * 10^{-9})}$$

$$R_e = \frac{3155 * 10^{-6}}{(2.62 * 10^{-8})} = 119419.8473 (\Omega) = \mathbf{119,4198(K\Omega)}$$

3.4. Construcción de elementos resistivos de 55 KΩ y 118 KΩ.

Dados ya los valores de las resistencias mediante simulación, cumpliendo con los requisitos necesarios que son los tiempos normalizados para el test de sobretensiones de tipo maniobra que son 250 μs en el pico máximo (T_p) y 2500 μs en el 50% del pico máximo de la onda llamado (T_2) y sabiendo la capacidad de las resistencias, se procede a la fabricación de las mismas bajo los mismas características y materiales que observamos en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, ver Fig. 48.

Para la construcción de las resistencias a utilizar en las pruebas, se tomaron como modelo las existentes en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, la cual detallamos a continuación:

3.4.1. Diseño y construcción de resistencias de alambre enrollado.

Las resistencias de alambre enrollado son un tipo de componentes pasivos en el que se utilizan cables de acero para reducir o restringir el flujo de corriente eléctrica a un cierto nivel.

Se hace enrollando el alambre metálico alrededor de un núcleo de metal. En resistencias de alambre enrollado, el alambre de acero se utiliza como elemento de resistencia y el núcleo de metal se utiliza como material no conductor.

El nicromo o manganina es comúnmente usado en los alambres de acero, debido a que proporcionan una alta resistencia a la corriente eléctrica y a poder ser operadas a altas temperaturas. Los materiales más usados incluyen el plástico, fibra de vidrio o

cerámica.

El alambre enrollado se cubre con un material aislante tal como el esmalte vítreo, que se opone o bloquea el calor exterior, esto conlleva a obtener una alta estabilidad. Por lo tanto, incluso en el calor de la alta temperatura no entra en la resistencia de alambre enrollado y lo hace ideal para pruebas en altas temperaturas.

La resistencia de alambre enrollado depende de tres factores:

- resistividad del alambre de metal
- longitud del alambre de metal
- área de la sección transversal del alambre de metal

Tipos de resistencias de alambre enrollado.

Las resistencias de alambre enrollado se clasifican en dos tipos:

- Resistencias bobinadas de potencia.
- Resistencias bobinadas de precisión.

Las resistencias bobinadas de potencia son de alambre enrollado no inductivas operadas a altas temperaturas. Se utilizan comúnmente para aplicaciones de alta potencia, funcionan a bajas temperaturas con gran precisión. Se utilizan en instrumentación debido a su alta precisión. (Radio-Electronics, 2013).

FIGURA 48: RESISTENCIAS Y MEDIDAS DE CONSTRUCCIÓN.



(LOS AUTORES)

3.4.2. Prueba teórica de calibración en resistencia de 55 KΩ.

Como se muestra en la figura 49, se realizó la medición de la resistencia de 55 kΩ para comprobar su corriente y verificar la calibración de la misma.

FIGURA 49: COMPROBACIÓN DE NIVELES DE RESISTENCIA DE 55 KΩ.



(LOS AUTORES)

Mediante ley de ohm se necesita comprobar que los valores resistencia de los dos componentes son los correctos, por lo que se realiza un cálculo de corriente con un voltaje máximo de 220 voltios, esperando que al instante de realizar la medición de forma real, coincidan las corrientes ya antes descritas, en ese instante mediante ley de ohm se procede a calcular la resistencia y así comprobar el valor en ohmios de las resistencias.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{55 \text{ V}}{55.000 \Omega} = 0.001 \text{ A} = 1 \text{ mA} \quad (\text{Cálculo Teórico})$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110 \text{ V}}{55.000 \Omega} = 0.002 \text{ A} = 2 \text{ mA}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{165 \text{ V}}{55.000 \Omega} = 0.003 \text{ A} = 3 \text{ mA}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220 \text{ V}}{55.000 \Omega} = 0.004 \text{ A} = 4 \text{ mA}$$

TABLA 4: CÁLCULO TEÓRICO DE RESISTENCIA 55K Ω.

Voltaje inducido (V)	Cálculo teórico de resistencia de 55 KΩ			
	Voltaje %	Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Corriente (mA)
55	25	55000	0.001	1
110	50	55000	0.002	2
165	75	55000	0.003	3
220	100	55000	0.004	4

(LOS AUTORES)

3.4.3. Prueba práctica de calibración en resistencia de 55 KΩ y margen de error.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{54.97 \text{ V}}{0.00101 \text{ A}} = 54425.74 \text{ } \Omega = 54.4257 \text{ K}\Omega \quad (\text{Cálculo Práctico})$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{110.1 \text{ V}}{0.00201 \text{ A}} = 54776.194 \text{ } \Omega = 54.776 \text{ K}\Omega$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{165.6 \text{ V}}{0.003 \text{ A}} = 55200 \text{ } \Omega = 55.200 \text{ K}\Omega$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{213.8 \text{ V}}{0.0039 \text{ A}} = 54820.512 \text{ } \Omega = 54.820 \text{ K}\Omega$$

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{\text{Valor Teórico} - \text{Valor Práctico}}{\text{Valor Teórico}} * 100\% \right|$$

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{55000 - 54425.742}{55000} * 100\% \right| = 1.044\%$$

TABLA 5: CÁLCULO PRÁCTICO DE RESISTENCIA 55K Ω Y MARGEN DE ERROR

Voltaje inducido (V)	Cálculo práctico de resistencia de 55 KΩ y margen de error				
	Voltaje %	Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Corriente (mA)	Error %
54.97	25	54425.74257	0.00101	1.01	1.044.104
110.1	50	54776.1194	0.00201	2.01	0.407055
165.6	75	55200	0.003	3	0.363636
213.8	100	54820.51282	0.0039	3.9	0.326340

(LOS AUTORES)

3.4.4. Prueba teórica de calibración en resistencia de 118 KΩ.

FIGURA 50: COMPROBACIÓN DE NIVELES DE RESISTENCIA DE 118 KΩ.





(LOS AUTORES)

$$I = \frac{V}{R} = \frac{55 \text{ V}}{118.000 \Omega} = 0.000466 \text{ A} = 0.466 \text{ mA} \quad (\text{Cálculo Teórico})$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110 \text{ V}}{118.000 \Omega} = 0.000932 \text{ A} = 0.932 \text{ mA}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{165 \text{ V}}{118.000 \Omega} = 0.001398 \text{ A} = 1.398 \text{ mA}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220 \text{ V}}{118.000 \Omega} = 0.001864 \text{ A} = 1.864 \text{ mA}$$

TABLA 6: CÁLCULO TEÓRICO DE RESISTENCIA 118K Ω.

Voltaje inducido (V)	Calculo teórico de resistencia de 118 KΩ			
	Voltaje %	Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Corriente (mA)
55	25%	118000	0.000466102	0.46610169
110	50%	118000	0.000932203	0.93220339
165	75%	118000	0.001398305	1.39830508
220	100%	118000	0.001864407	1.86440678

(LOS AUTORES)

3.4.5. Prueba práctica de calibración en resistencia de 118 KΩ y margen de error.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{55.47 \text{ V}}{0.00047 \text{ A}} = 118021.27 \Omega = 118.021 \text{ K}\Omega \quad (\text{Cálculo Práctico})$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{110.2 \text{ V}}{0.00093 \text{ A}} = 118494.62 \Omega = 118.494 \text{ K}\Omega$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{164.9 \text{ V}}{0.00139 \text{ A}} = 118633.09 \Omega = 118.633 \text{ K}\Omega$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{212.6 \text{ V}}{0.00179 \text{ A}} = 118722.07 \Omega = 118.722 \text{ K}\Omega$$

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{\text{Valor Teórico} - \text{Valor Práctico}}{\text{Valor Teórico}} * 100\% \right|$$

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{118000 - 118021.2766}{118000} * 100\% \right| = 1.044\%$$

TABLA 7: CÁLCULO PRÁCTICO DE RESISTENCIA 118K Ω Y MARGEN DE ERROR.

Voltaje inducido (V)	Cálculo práctico de resistencia de 118 K Ω y margen de error				
	Voltaje %	Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Corriente (mA)	Error %
55.47	25%	118.021276	0.00047	0.47	0.018031
110.2	50%	118.494623	0.00093	0.93	0.419172
164.9	75%	118.633093	0.00139	1.39	0.536519
212.6	100%	118.722075	0.00179	1.853	0.611924

(LOS AUTORES)

3.5. Construcción de cápsulas para resistencias de 55 K Ω y 118 K Ω .

Para la construcción de la cápsula que contiene la resistencia se tomó en cuenta diversos factores no solo de estética o que la cápsula se acople a la resistencia correctamente, sino también a factores como la resistencia de aislamiento de las cápsulas para seguridad de quien las opere en trabajos posteriores. Para esto se realizó una cápsula de fibra de vidrio, ver Fig. 51, para seguir un patrón de elementos y a su vez es el material del que están hechos los distintos equipos de laboratorio.

FIGURA 51: DISEÑO DE CÁPSULA PARA RESISTENCIAS.



(LOS AUTORES)

3.6. Construcción de tapas para sellado de resistencias.

Para la construcción y fabricación de las tapas se utilizó aluminio (ver Fig. 52), debido a su durabilidad y a que la misma tiene un peso ligero para así poder tener un equipo liviano para su manipulación. Elemento blando pero resistente, que posee una densidad más baja que el acero o el cobre; es el elemento más indicado.

FIGURA 52: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE TAPAS.



(LOS AUTORES)

3.7. Construcción de anillos y puntas para sellado de resistencias.

Para la construcción de los anillos y las puntas, se tomó como referencia el mismo material anteriormente utilizado (ver Fig. 53); y, sabiendo que estas piezas son de suma importancia, ya que en ésta es donde se realiza la sujeción de todos los elementos. Así mismo las puntas tienen como función acoplarse directamente a las bases de conexión o nodos en laboratorio.

FIGURA 53: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ANILLOS Y PUNTAS.



(LOS AUTORES)

3.8. Ensamblado de las resistencias.

Como producto final, después de realizar la construcción de las diversas piezas, se tiene listo los elementos para ensamblar las resistencias, ver Fig. 54.

FIGURA 54: ENSAMBLADO DE RESISTENCIAS.



(LOS AUTORES)

Posterior al ensamblaje de la resistencia con todas sus piezas se procedió a las respectivas pruebas, como lo es resistencia de aislamiento y prueba de potencial en DC, como se detalla a continuación:

¿QUE ES AISLAMIENTO?

Todo alambre eléctrico en una instalación, ya sea un motor, generador, cable, interruptor o cualquier cosa que esté cubierta con alguna forma de aislamiento eléctrico. Aunque el alambre en sí es un buen conductor (generalmente de cobre o aluminio) de la corriente eléctrica que da potencia al equipo eléctrico, el aislamiento debe resistir la corriente mantenerla en su trayectoria a lo largo del conductor. La comprensión de la Ley de Ohm, que se enuncia en la Ecuación 6, es la clave para entender la prueba de aislamiento:

ECUACIÓN 6: LEY DE OHM.

$$V = I \times R$$

(BUBAN & MARSHALL L., 1983)

Donde:

V = Voltaje en volts

I = Corriente en amperios.

R = Resistencia en ohm.

Para una resistencia dada, a mayor voltaje, mayor corriente. Alternativamente, a menor resistencia del alambre, mayor es la corriente que fluye con el mismo voltaje. Ningún aislamiento es perfecto (no tiene resistencia infinita), por lo que algo de la corriente fluye por el aislamiento o a través de él a tierra. Tal corriente puede ser muy pequeña para fines prácticos pero es la base del equipo de prueba de aislamiento. Entonces, ¿qué es un “buen” aislamiento? “Bueno” significa una resistencia relativamente alta al flujo de la corriente. Cuando se usa para describir un material aislante, “bueno” también significa la capacidad para mantener una resistencia alta. La medición de la resistencia puede decir que tan “bueno” es el aislamiento.

Posterior a la construcción de las cápsulas que alojan las resistencias se procedió a realizar la respectiva prueba de aislamiento con un MEGGER que tiene por unidad de

medida el ohmio (Ω); equipo que realizará una medición de lo que es la resistencia de aislamiento del equipo en mención durante un lapso de 60 segundos a 5000 voltios. Es una prueba de suma importancia, ya que de esto depende la seguridad eléctrica al momento de maniobrar o manipular la cápsula, o a su vez al momento en el que se utilizan para pruebas de alta tensión. Teniendo en cuenta que niveles de resistencia de aislamiento óptimos se tomó como referencia la medición de la cápsula original de laboratorio, según la medición en el MEGGER el valor de resistencia de aislamiento en el equipo original de laboratorio según las dos pruebas que se realizó, registró un valor promedio de 234 M Ω , ver Fig. 55. Teniendo así una referencia de los valores que deben cumplir las cápsulas que alberguen las resistencias construidas.

FIGURA 55: MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE CÁPSULA DE LABORATORIO.



(LOS AUTORES)

3.8.1. Pruebas de aislamiento en cápsulas de elementos resistivos.

- **Cápsula No. 1 - Prueba con MEGGER.**

Como ya es de conocimiento el ingreso de voltaje durante 60 segundos determinará si el nivel de aislamiento es óptimo para empezar a funcionar en conjunto a la resistencia de alta tensión.

FIGURA 56: MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE CÁPSULA 1.



(LOS AUTORES)

La primera cápsula tiene un nivel de resistencia de aislamiento aceptable, ver Fig. 56, por lo que el elemento está apto para su utilización.

- **Cápsula No. 2 - Prueba con MEGGER.**

En la medición de las pruebas de resistencia de aislamiento se obtuvo los siguientes valores como se muestra a continuación.

FIGURA 57: MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE CÁPSULA 2 ANTES DE COLOCAR BARNIZ.



(LOS AUTORES)

La segunda cápsula no está apta para el funcionamiento con las demás resistencia, por su bajo nivel de resistencia de aislamiento (ver Fig. 57) con respecto a la resistencia original. Dado el siguiente limitante, se procedió a realizar un procedimiento correctivo o de ayuda a la cápsula para que así pueda cumplir con la resistencia de aislamiento.

Para poder aumentar la resistencia de aislamiento se tienen las siguientes opciones:

- Verificar que la cápsula no contenga humedad. La misma que hace que el índice de aislamiento sea bajo.
- Verificar grietas en la cápsula.

- Aumentar la robustez de la cápsula con más fibra de vidrio.
- Verificar humedad y aplicarle capas de barniz rojo, el mismo que es utilizado para barnizar el bobinado de motores.

Para corregir la limitante de la cápsula, se optó por quitarle la humedad de la misma, insertándole resistencias para calentar su interior, para posterior aplicar una capa de barniz transparente en su interior. Después de esto se procedió a aplicar dos capas de barniz rojo en su exterior. Proceso del cual se espera sea suficiente para aumentar su resistencia de aislamiento.

FIGURA 58: MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE CÁPSULA 2 DESPUÉS DE COLOCAR BARNIZ.



(LOS AUTORES)

Después de haber realizado acciones para la mejora del equipo se observó que en la prueba de aislamiento del elemento es satisfactoria muy por encima del elemento original, ver Fig. 58. Por lo que se procederá a la continuación al ensamblaje total del equipo.

3.9. Ensamble total de los elementos resistivos.

Se realizó en el ensamblaje final de los elementos resistivos teniendo como resultado final, una resistencia de 118 K Ω y una resistencia de 55 K Ω , con sus respectivas cápsulas y tapas.

El ensamblado final de las resistencias de 118 K Ω y 55 K Ω se puede ver a continuación, ver Fig. 59.

FIGURA 59: ENSAMBLE TOTAL DE LOS ELEMENTOS.



(LOS AUTORES)

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para llevar a cabo la validación del modelado matemático, se realizaron las pruebas respectivas en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana. Como punto de partida para la misma se realizó la prueba de calibración de ambas resistencias y poder conocer de manera real el valor de resistencia de cada elemento. Para esta prueba se utilizó un auto-transformador o variac para generar voltajes de 55V/110V/165V/220V. Como equipo de medida se utilizó:

- FLUKE 175 TRUE RMS MULTIMETER.
- FLUKE 376 TRUE RMS CLAMP METER.

FIGURA 60: MULTÍMETRO Y AMPERÍMETRO FLUKE.



(FLUKE CORPORATION INC., 2016)

La fuente de voltaje será suministrada por un auto-transformador de 0V-220V.

FIGURA 61: ELEMENTOS PARA HACER ENSAMBLADOS.



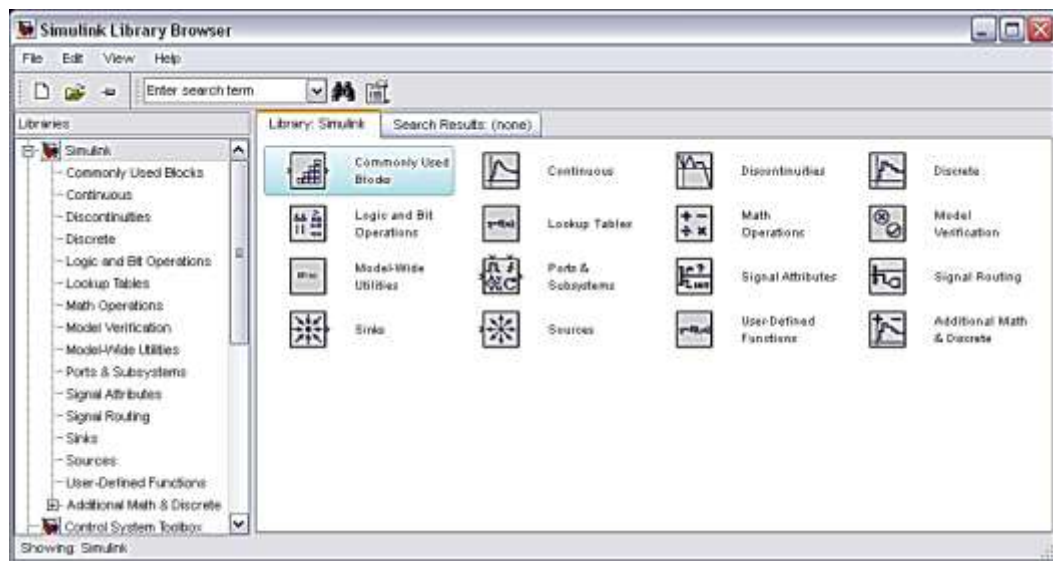
(POZUETA)

Posterior a identificar los elementos a utilizar, se realizó la medición de corriente en las resistencias y mediante ley de ohm se verificó el valor óhmico de resistencia que posee cada uno de los elementos.

4.1. Simulación.

4.1.1. Simulink.

FIGURA 62: LIBRERÍA DE SIMULINK.



(LOS AUTORES)

Simulink es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Permite el diseño y la simulación a nivel de sistema, la generación automática de código y la prueba y verificación continuas de los sistemas. También ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables, para modelar y simular sistemas dinámicos, ver Fig. 62. Se integra con MATLAB®, lo que permite incorporar algoritmos de MATLAB® en los modelos y exportar los resultados de la simulación a MATLAB® para llevar a cabo más análisis.

Se puede decir que es una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace referencia en análisis de sucesos, a través de la realización de sistemas.

Posee varios conjuntos de bloques predefinidos que se pueden combinar para poder crear un diagrama de bloques detallado de un sistema de forma precisa y concisa. Las

herramientas de modelado jerárquico, gestión de datos y personalización de subsistemas son otras de sus herramientas poderosas.

La librería de Simulink contiene bloques empleados habitualmente para modelar un sistema; las cuales incluyen:

- Bloques dinámicos continuos y discretos
- Bloques de algoritmos
- Bloques estructurales

Es posible crear funciones personalizadas mediante el uso de estos bloques o a través de la incorporación de código de MATLAB®. Los bloques personalizados se pueden almacenar en sus propias bibliotecas dentro de su biblioteca.

Las herramientas de formato gráficas, como las guías inteligentes y el enrutamiento de señales inteligente, ayudan a controlar el aspecto del modelo. Es posible agregar jerarquías mediante el encapsulamiento de un grupo de bloques y señales a modo de subsistema en un único bloque ofreciendo un control total sobre lo que se ve y se utiliza en el modelo.

Se puede simular el comportamiento dinámico del sistema y ver los resultados a medida que se ejecuta la simulación; garantizando la velocidad y la precisión de la simulación a través de solvers de ecuaciones diferenciales ordinarias de paso fijo y paso variable, un depurador gráfico y un analizador de rendimiento de modelos.

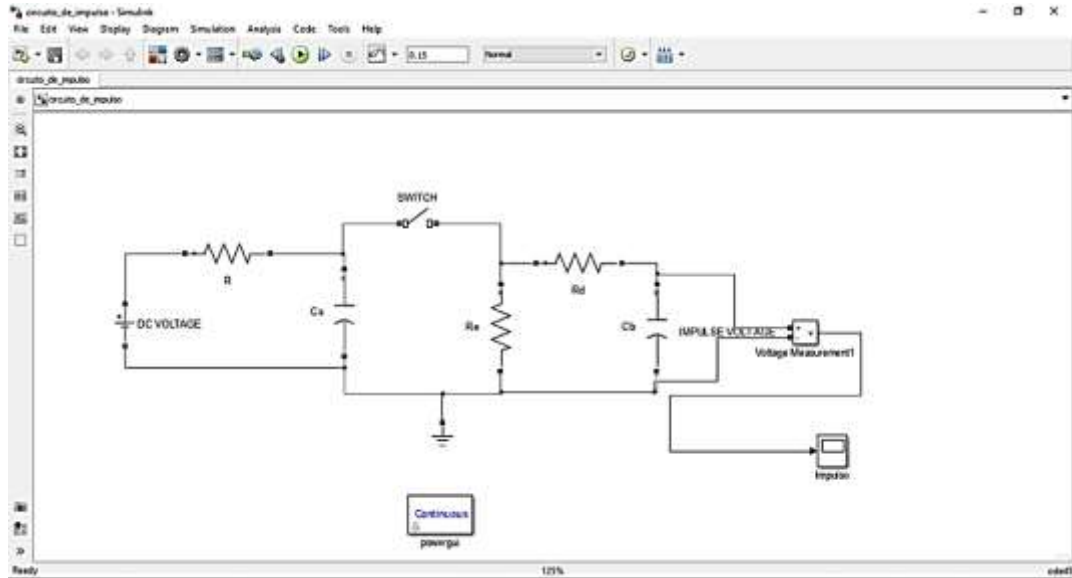
La simulación puede ejecutarse de forma interactiva desde el editor de Simulink o de forma sistemática desde la línea de comandos de MATLAB®. Existen los siguientes modos de simulación:

- Normal, que simula el modelo interpretándolo.
- Acelerador, que aumenta el rendimiento de la simulación mediante la creación y ejecución de código específico compilado.
- Acelerador Rápido, que puede simular modelos con mayor velocidad que el modo Acelerador.

Simulink incluye herramientas de depuración para ayudarle a entender el comportamiento de la simulación, pudiendo visualizar las señales en la pantalla.

También se puede crear pantallas personalizadas mediante la herramienta de visualización GUI de MATLAB®.

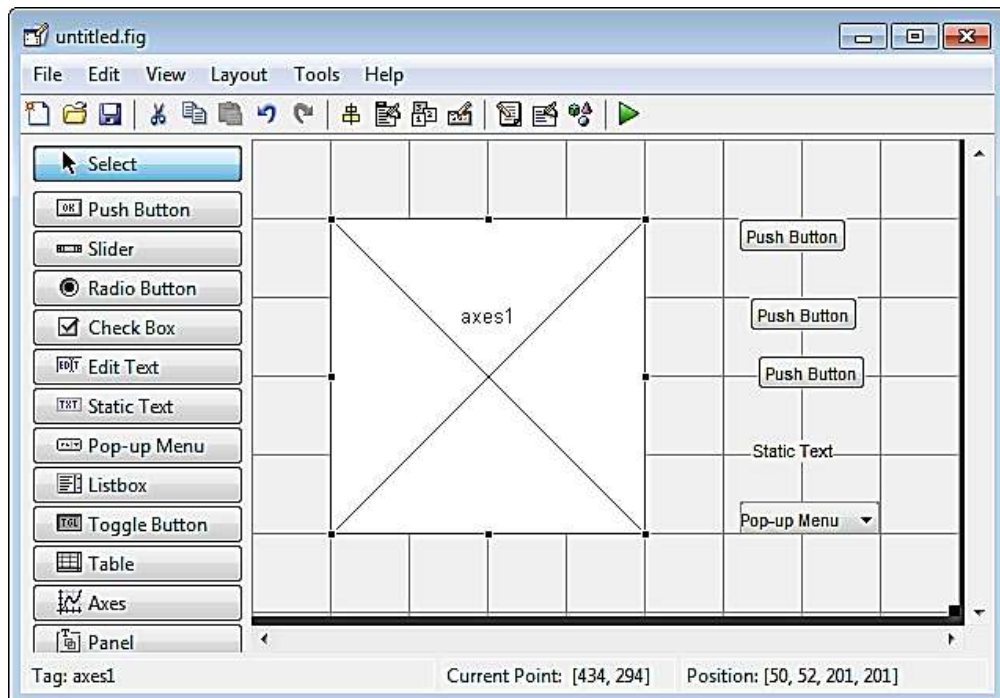
FIGURA 63: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO EN SIMULINK.



(LOS AUTORES)

4.1.2. GUI de MATLAB®.

FIGURA 64: GUI (GRAPHICAL USER INTERFACE).



(LOS AUTORES)

Las GUI (conocidas como interfaces gráficas de usuario o interfaces de usuario), ver Fig. 64, permite un control sencillo de las aplicaciones de software, lo cual elimina la necesidad de aprender un lenguaje y escribir comandos. Por lo general, la GUI incluye controles tales como menús, barras de herramientas, botones y controles deslizantes. Se puede crear un GUI de MATLAB® de forma interactiva mediante el editor de diseño de GUIDE. Aquí se crea de manera automática el código de MATLAB® para construir la interfaz.

También de forma programática se puede crear un GUI de MATLAB®, donde se puede añadir cuadros de diálogos, controles de interfaz de usuario (como botones y controles deslizantes) y contenedores (como paneles y grupos de botones).

Las aplicaciones GUIDE constan de dos archivos: .m y .fig. El archivo .m es el que contiene el código con las correspondencias de los botones de control de la interfaz; y el archivo .fig contiene los elementos gráficos.

Cada vez que se adicione un nuevo elemento en la interfaz gráfica, se genera automáticamente un código en el archivo .m.

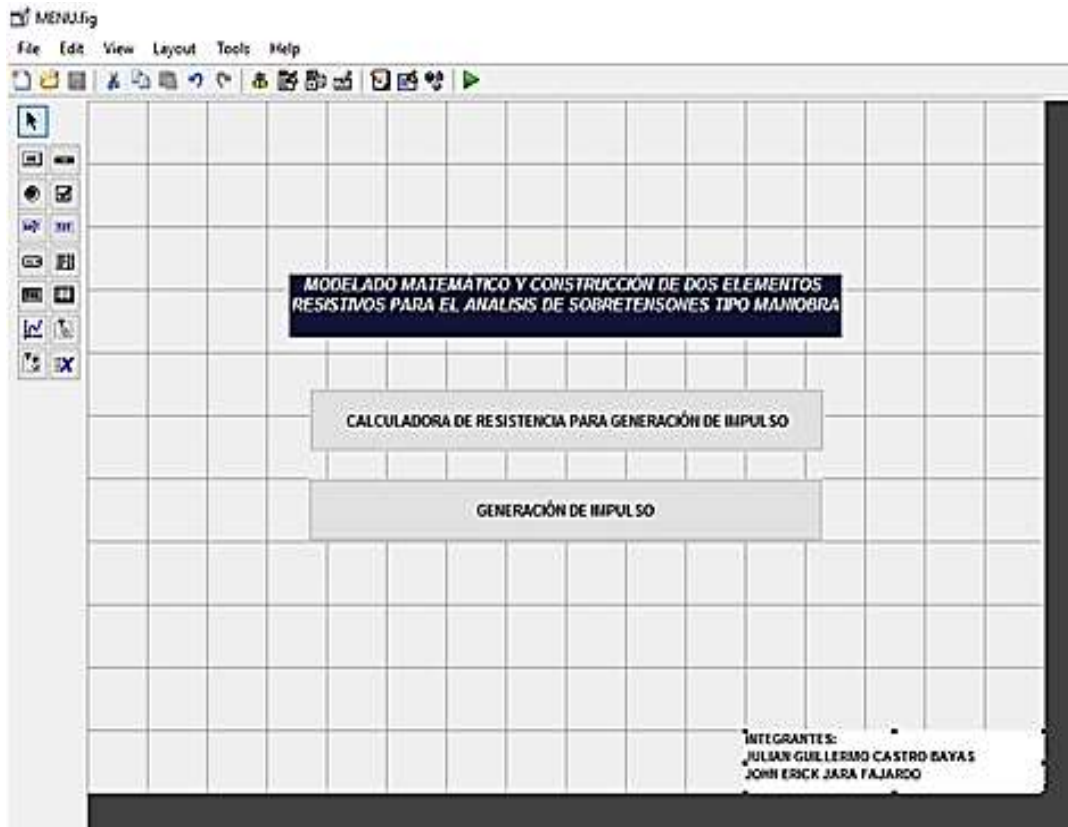
4.1.3. Realización de interfaz gráfica.

Para la realización del análisis de ecuaciones y la interfaz gráfica fue necesario la herramienta matemática MATLAB® y de sus elementos de simulación y cálculo como lo es Simulink, el editor de códigos y la herramienta grafica GUIDE. Las mismas que obtendrán sus datos mediante hojas de Excel o por variables previamente detalladas y programadas en el código.

4.1.3.1. Presentación.

Para el inicio del trabajo de titulación, se tiene la interfaz de presentación la cual posee información acerca de; nombres de autores del trabajo de titulación, nombre de la institución, título del trabajo de titulación. La misma que tiene botones de selección para el ingreso a los distintos entornos, ver Fig. 63. El método que se utilizó para la creación de la interfaz fue el editor de código, para lo cual si se busca darle un mejor aspecto a la interfaz de presentación se debe asignar una imagen previamente programada, la cual es el fondo de nuestro GUIDE, ver Fig. 65, 66.

FIGURA 65: CREACIÓN DEL GUIDE.



(LOS AUTORES)

FIGURA 66: GUIDE DE PRESENTACIÓN.



(LOS AUTORES)

4.1.3.2. Parámetros de cálculo.

FIGURA 67: CALCULADORA DE RESISTENCIAS.



(LOS AUTORES)

Al presionar el primero de los elementos de selección, como lo es “CALCULADORA DE RESISTENCIAS PARA GENERACIÓN DE IMPULSO”. Se abrirá una nueva pantalla, ver Fig. 67. La misma que tendrá como elementos importantes, el menú de selección de los distintos tipos de capacitores a utilizar. Recordando que esta interfaz está enfocada en suplir o calcular dos elementos resistivos que se adapten a la necesidad del laboratorio. Teniendo en cuenta que el mismo puede contar con otros niveles de capacitancia. Pues esta interfaz está en la capacidad de adaptar dos resistencias de impulso (frente-cola) para casos como impulsos de tipo maniobra e impulsos de tipo atmosférico. Siendo una herramienta importante para el inicio de un análisis de sobretensiones. Para poder realizar las diferentes tipos de operaciones matemáticas es necesario configurar cada uno de los botones como lo es:

- Edit text button.
- Axes (Gráficos).
- Pop-up menú.
- Push button.

Edit text button.

Este botón tiene como función el recibir el nivel de voltaje en el cual se va a realizar la simulación del impulso, valores que están en consideración de la persona quien va a realizar dicha simulación. En el caso específico de este trabajo de titulación, se realizaron pruebas con niveles de voltaje de hasta 100 KV. El mismo que posee el código a continuación.

```
Vo=get(handles.ValorVoltaje,'String');
```

En primera instancia se crea la variable Vo, variable que tiene como función obtener la información u obtener el dato numérico que ingrese en el edit text button, recordando que “ValorVoltaje” es el nombre que se le dio al elemento en el GUIDE. Por lo que se obtendrá información de esta variable en específico.

Pop-up menú.

Este botón tiene como función recibir la información anteriormente programada en el GUIDE, como datos de la variable. En este caso, en el GUIDE se ingresaron datos numéricos como lo son:

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">● Capacitor de Carga: | <ul style="list-style-type: none">● Capacitor de Impulso: |
| - $1.2 * 10^{-9}$ | - $25 * 10^{-9}$ |
| - $1.5 * 10^{-9}$ | - $27 * 10^{-9}$ |
| - $1.8 * 10^{-9}$ | - $33 * 10^{-9}$ |
| - $2.2 * 10^{-9}$ | - $39 * 10^{-9}$ |
| - $2.7 * 10^{-9}$ | - $47 * 10^{-9}$ |
| - $3.3 * 10^{-9}$ | - $56 * 10^{-9}$ |
| - $3.9 * 10^{-9}$ | - $68 * 10^{-9}$ |
| - $4.7 * 10^{-9}$ | - $82 * 10^{-9}$ |

Estos datos de capacitor tendrán que llevar en código la siguiente forma:

```
Cs=get(handles.Capacitor1,'String');  
m=get(handles.Capacitor1,'Value');  
Cs=sym(Cs(m));
```

```
Cb=get(handles.Capacitor2,'String');
```



```
p=get(handles.Capacitor2,'Value');  
Cb=sym(Cb(p));
```

En primera instancia se debe declarar la variable a utilizar, en este caso tendrán como nombre Cs y Cb. Donde las mismas obtendrán la información del pop-up menú. Se debe declarar una variable que se encargue de transformar la información del pop-up menú (String) en un dato numérico como se muestra a continuación. Posterior a esto se declara una variable imaginaria 'sym' la cual tendrá como objetivo leer las variables de cada uno de los capacitores y transformarlos a datos numéricos.

```
m=get(handles.Capacitor1,'Value');
```

Realizando el ingreso de variables del pop-up menú se procede a declarar las variables a utilizar durante el proceso de cálculo de resistencias.

Como se es de conocimiento, en la Tabla 3, donde se detallan las constantes de tiempo para la generación del impulso de maniobra, este es una de las variables más importantes en declarar, ya que de esta depende el tiempo de carga en el capacitor C_s (capacitor de impulso) y de la descarga en C_b (capacitor de carga).

```
syms a b c d e f zs zp t1 t2 Re Rd
```

```
t1=6.25915e-5;
```

```
t2=0.003155;
```

Posterior a esto se procede mediante el modelo matemático, detallado en el Capítulo 3, ingresar las ecuaciones para el cálculo de las respectivas resistencias de frente (R_d) y cola (R_e).

```
zp=Cs+Cb;
```

```
zs=Cs*Cb;
```

```
a=zs;
```

```
c=t1;
```

```
e=zp;
```

```
f=t2;
```

```
%CALCULO RESISTENCIAS
```

```
Rd=(c*e)/a
```

```
Re=f/e
```

Una vez realizado el cálculo de las resistencias R_d y R_e , se procedió a programar el muestreo de los resultados en la interfaz gráfica, para esto se debió tener en cuenta los nombres de los “edit-text”, ya que para poder realizar el llamado de datos calculados se debió configurar la ruta para que pueda ser visible el resultado, en este caso en específico se procedió a configurar las variables con el nombre “Rfrente” y “Rcola” como se muestra a continuación estableciendo las propiedades del objeto a graficar y a su vez la variable “char” tiene como objetivo transformar el dato numérico a caracteres para posterior ser leído.

```
%MOSTRAR RESULTADOS
```

```
set(handles.Rfrente,'String',char(Rd));
```

```
set(handles.Rcola,'String',char(Re));
```

Como paso siguiente, se debió ingresar las ecuaciones para el cálculo del voltaje de capacitor mediante Laplace. Esto se realizó con un conjunto de ecuaciones, anteriormente enlistadas en el modelado matemático para obtener una ecuación final en el dominio S para lo cual se debe aplicar la anti-transformada de Laplace para así poder observar la magnitud del voltaje del capacitor C_b en el dominio del tiempo.

```
%CALCULO DE CORRIENTE
```

```
z1=Rd+1/(s*Cb);
```

```
z2=Re;
```

```
z3=1/(s*Cs);
```

```
%IMPEDANCIAS EQUIVALENTES Ze
```

```
ze=z3+z1*z2/(z1+z2);
```

```
I=((Vo)/s)/ze;
```

```
%CALCULO DE CORRIENTE Ie-Id POR DIVISION DE  
CORRIENTE
```

```

Ie=I*(z1/(z1+z2));
Id=I*(z2/(z1+z2));

% VOLTAJE DEL CAPACITOR DE CARGA
VCb=Id*1/(s*Cb);
VCb=simplify(VCb);
disp(' ');
disp(' ');

%disp('RESULTADO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA')
%PARA CALCULAR VCb(t) EN EL DOMINIO DEL TIEMPO
%SE APLICA LA ANTI-TRANSFORMADA DE LAPLACE
vCb=ilaplace(VCb);
disp(' ');
disp(' ');
%disp('RESULTADO EN EL TIEMPO: ');
%pretty(vCb);

```

Para poder observar la respuesta al impulso se debió crear una nueva variable utilizando el comando “ezplot”, que permitió poder graficar el nivel de voltaje (vCb-tiempo) mediante el siguiente código.

```

%GRAFICO EN EL TIEMPO
h=ezplot(vCb,[0 0.0100]);
grid on;
set(gca, 'XColor', 'b')
set(gca, 'YColor', 'b')
title(' ')
set(h,'LineWidth',2)
set(h,'Color','b')

figure(1)
h=ezplot(vCb,[0 0.0100]);
grid on

```

```

title(' ')
set(h,'LineWidth',2)
set(h,'Color','r')

```

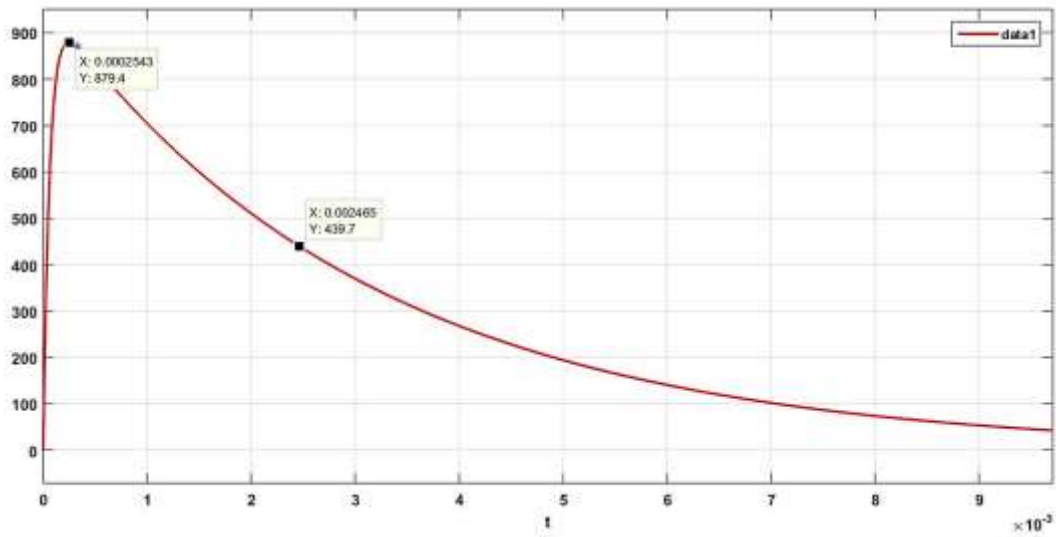
FIGURA 68: SIMULACIÓN REAL DE CÁLCULO DE RESISTENCIAS.



(LOS AUTORES)

El resultado final fue el cálculo de la resistencia de frente onda y resistencia de cola de onda para el análisis de sobretensiones, ver Fig. 68. Siendo este el paso previo para la fabricación de las resistencias de impulso. A su vez la interfaz tiene la opción de poder verificar si el cálculo de esta interfaz es satisfactorio. Para ello se abrirá una pantalla adicional, la misma que permite realizar un barrido sobre la onda de simulación obtenida, con el objetivo de poder comprobar que los tiempos se cumplen con respecto a los tiempos normalizados de impulso (250 μ s-2500 μ s), ver Fig. 69.

FIGURA 69: SIMULACIÓN REAL DE IMPULSO DE MANIOBRA.

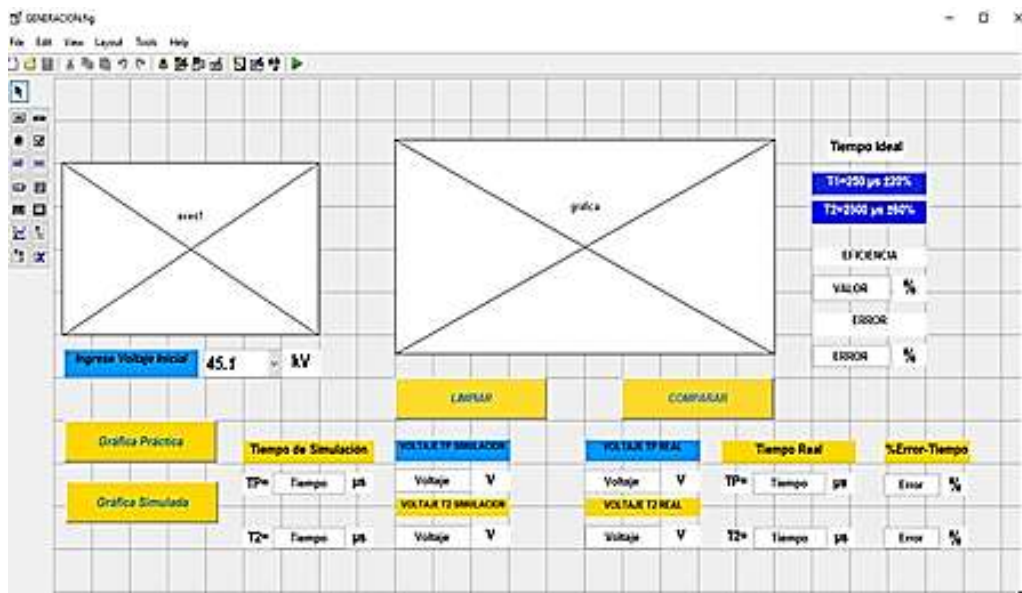


(LOS AUTORES)

Después de obtener los niveles de resistencia para este tipo de impulso y realizar las pruebas de calibración, se procedió a realizar el respectivo análisis comparativo en otra hoja del GUIDE. Como lo es en la hoja de “GENERACIÓN DE IMPULSO”.

Para la elaboración de esta interfaz gráfica fue necesario un extenso código, ya que es en esta programación donde se resuelve todas las operaciones necesarias para fundamentar el trabajo de titulación. Para esto se inició con la elaboración de la interfaz, ver Fig. 70.

FIGURA 70: INTERFAZ DE GENERACIÓN DE IMPULSO.



(LOS AUTORES)

Esta interfaz puede ser controlada dependiendo de los requerimientos a simular, para objetivos de este trabajo de titulación se realizó la programación con tres niveles de voltaje que son producto de distintas pruebas en laboratorio, dando origen a los niveles de voltajes, producto de la separación entre esferas en el circuito de generación de impulso:

- 45.100 KV / 8mm
- 59.100 KV / 10mm
- 74.800 KV / 15mm

En la parte superior, Fig. 70, se puede observar los tiempos ideales que el trabajo de titulación debe cumplir, teniendo como limitantes:

- $T_p = 250 \mu s \pm 20\%$
- $T_2 = 2500 \mu s \pm 60\%$

En el instante que se elige como opción “Gráfica Práctica” o “Gráfica Simulada”, en ese instante el código anteriormente programado realiza las operaciones realizadas en el laboratorio. Pruebas que se detallan a continuación.

4.2. Análisis y comparación de resultados.

Aquí podemos observar el comportamiento de las señales de impulso en modelado matemático y la señal de impulso de forma real. Para esto se debe tener en cuenta dos tipos de resultados.

- Gráfica simulada.
- Gráfica práctica.

4.2.1. Análisis de gráficas simuladas.

Se observar que al pulsar “Gráfica Simulada”, obtuvimos como resultado la tabulación de cada uno de los niveles de voltaje con sus respectivas distancias de separación entre

esferas, ver tabla 8, 10 y 12. Valores que posteriormente dieron forma a la gráfica simulada y así poder observar el comportamiento de la misma.

TABLA 8: GENERACIÓN DE VOLTAJE A 45100 V. (SIMULADO).

Generación de voltaje a 45100 V con distancia de 8 mm entre explosores	
Tiempo (μs)	Voltaje simulado (V)
2.40E-05	13170
9.24E-05	32500
1.39E-04	37120
2.08E-04	39430
2.54E-04	39660
3.23E-04	39280
4.62E-04	37780
6.70E-04	35360
2.33E-03	20690
2.49E-03	19640
2.52E-03	19500
2.79E-03	17890
3.28E-03	15250
3.76E-03	13040

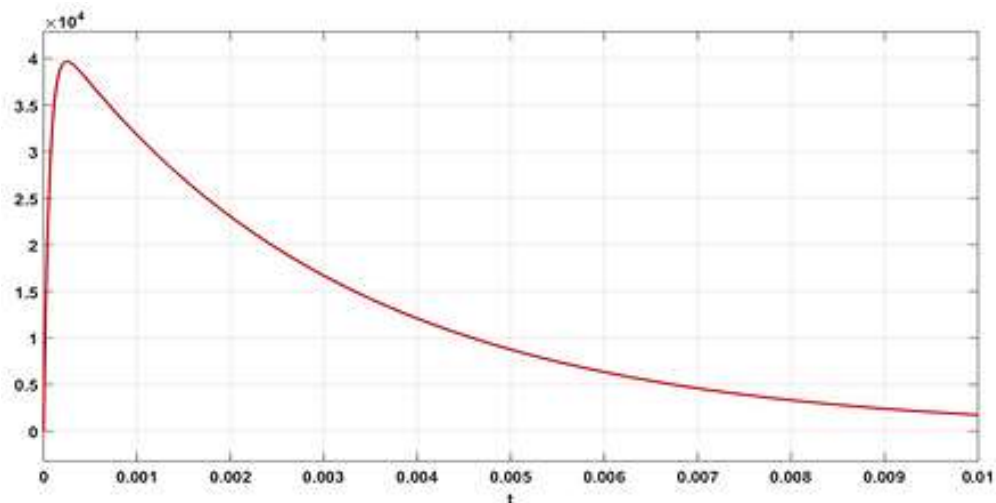
(LOS AUTORES)

TABLA 9: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE TIEMPO IDEAL VS TIEMPO DE SIMULACIÓN A 45100 V. (SIMULADO).

Porcentaje de error entre tiempo ideal vs tiempo de simulación			
Tiempo	Tiempo de simulación (s)	Tiempo real (s)	% Error
Tiempo Tp (s)	0.000254	0.000250	1.6
Tiempo T2 (s)	0.002517	0.00250	0.68

(LOS AUTORES)

FIGURA 71: GRÁFICA SIMULADA A 45100 V.



(LOS AUTORES)

Para separación de explosores de 10 mm se necesitó un voltaje de 59100 V para poder generar el impulso de maniobra, ver tabla 10.

TABLA 10: GENERACIÓN DE VOLTAJE A 59100 V. (SIMULADO).

Generación de voltaje a 59100 V con distancia de 10 mm entre explosores	
Tiempo (μs)	Voltaje simulado (V)
1.60E-04	50190
2.00E-04	51670
2.40E-04	51945
2.54E-04	51970
3.20E-04	51480
3.60E-04	51045
4.40E-04	50560
6.80E-04	46165
2.00E-03	30210
2.12E-03	28890
2.32E-03	27120
2.47E-03	26520
2.50E-03	25645
2.68E-03	24250
2.84E-03	22850
3.00E-03	22020

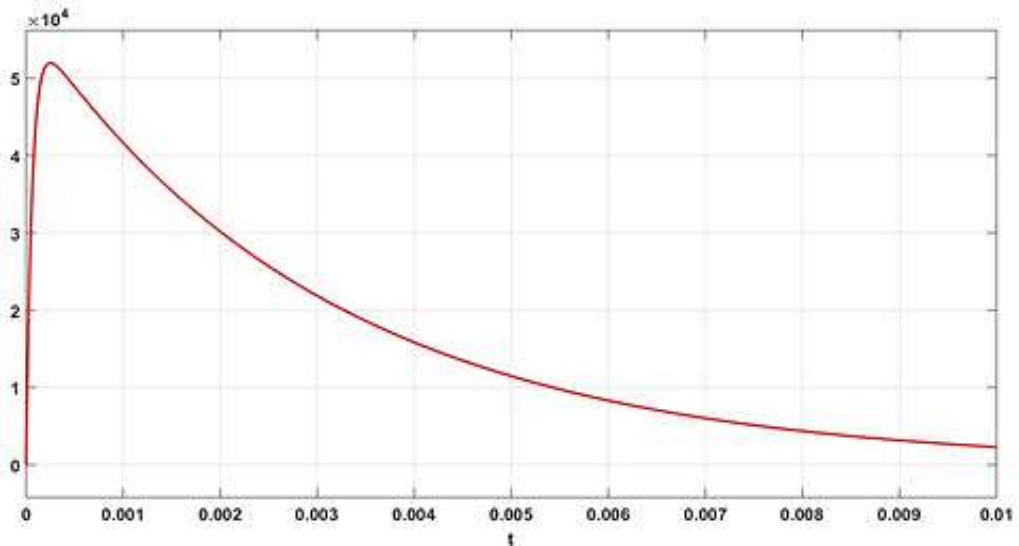
(LOS AUTORES)

TABLA 11: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE TIEMPO IDEAL VS TIEMPO DE SIMULACIÓN A 59100 V. (SIMULADO).

Porcentaje de error entre tiempo ideal vs tiempo de simulación			
Tiempo	Tiempo de simulación (s)	Tiempo real (s)	% Error
Tiempo Tp (s)	0.000254	0.000250	1.6
Tiempo T2 (s)	0.002471	0.00250	1.16

(LOS AUTORES)

FIGURA 72: GRÁFICA SIMULADA A 59100 V.



(LOS AUTORES)

Por último tenemos los datos experimentales con una separación de 15 mm entre explosores, necesitando 74800 V para poder generar el impulso de maniobra, ver tabla 12.

TABLA 12: GENERACIÓN DE VOLTAJE A 74800 V. (SIMULADO).

Generación de voltaje a 74800 V con distancia de 15 mm entre explosores	
Tiempo (μs)	Voltaje simulado (V)
2.30E-06	2.18E+04
4.00E-05	36800
7.00E-05	47000

1.40E-04	61570
1.80E-04	64720
2.00E-04	65400
2.54E-04	65700
3.00E-04	65500
8.00E-04	56100
9.00E-04	54400
1.20E-03	49400
1.50E-03	44900
2.00E-03	37800
2.17E-03	36200
2.29E-03	34800
2.38E-03	33800
2.52E-03	32340
3.00E-03	27700
3.79E-03	21500
4.11E-03	19350

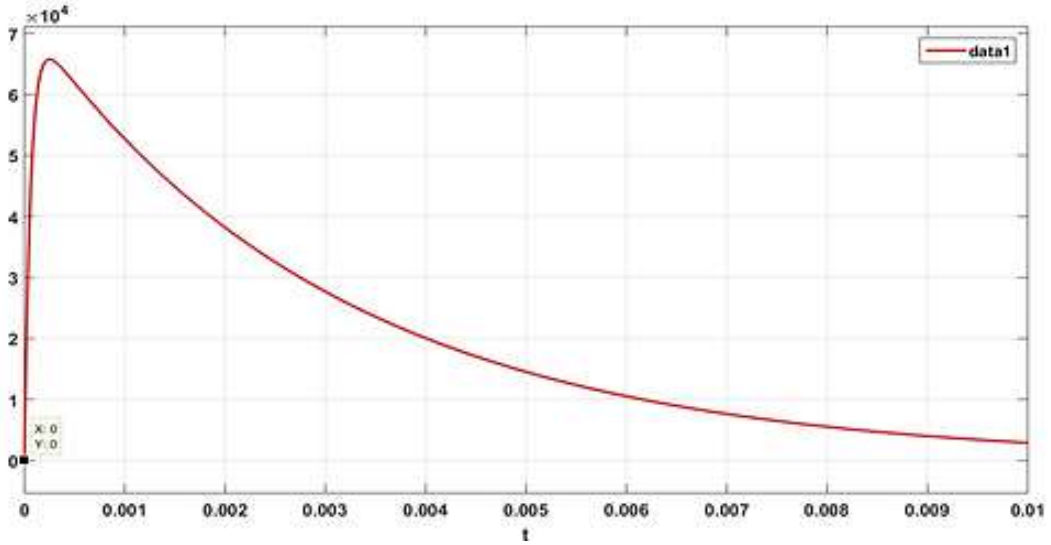
(LOS AUTORES)

TABLA 13: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE TIEMPO IDEAL VS TIEMPO SIMULADO A 74800 V. (SIMULADO).

Porcentaje de error entre tiempo ideal vs tiempo de simulación			
Tiempo	Tiempo de simulación (s)	Tiempo real (s)	% Error
Tiempo Tp (s)	0.000254	0.000250	1.6
Tiempo T2 (s)	0.002448	0.00250	2.08

(LOS AUTORES)

FIGURA 73: GRÁFICA SIMULADA A 74800 V



(LOS AUTORES)

Teniendo ya conocimiento de los resultados de simulación vs los tiempos ideales para el impulso de maniobra, se procedió a realizar el respectivo análisis real con los equipos construidos. Para lo cual se realizó estas pruebas en los niveles de voltaje anteriormente detallados, con el fin de realizar una comparación de resultados y del comportamiento de la señal de impulso.

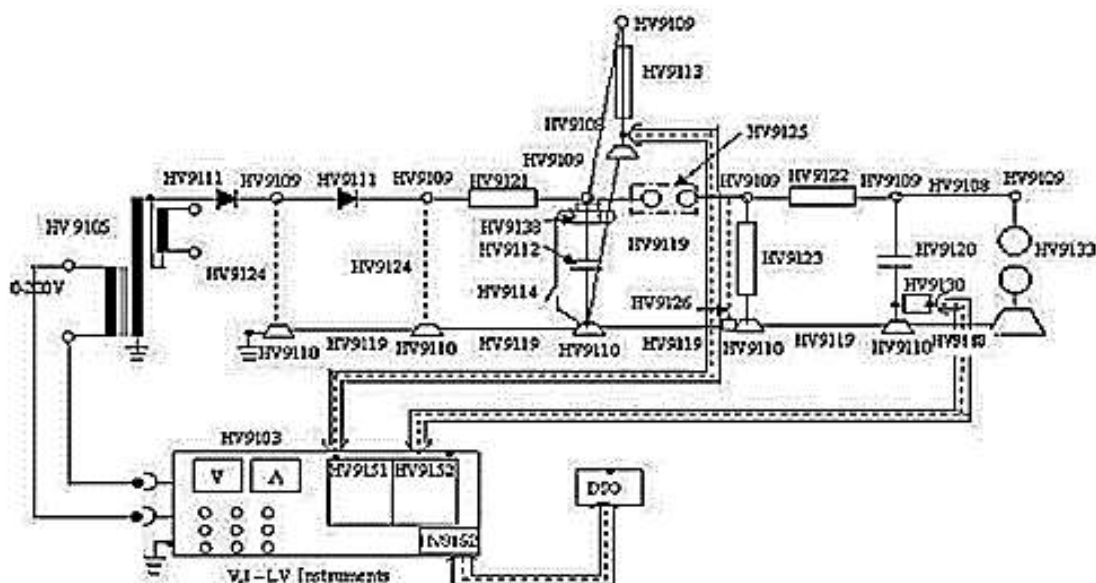
4.2.2. Análisis de gráficas prácticas.

Para programar este botón (gráfica práctica) en la interfaz gráfica, fue necesario realizar las respectivas pruebas en el laboratorio pudiendo observar el comportamiento del impulso de maniobra de forma real.

Para ello se debió tener en cuenta, como norma general, la inspección visual del laboratorio y limitar los procesos a los necesarios para realizar este tipo de pruebas; ya que, de respetar estas normas, depende nuestra seguridad física en el laboratorio.

Posterior a esto se debió tener en cuenta que el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana cuenta con un manual de prácticas, el cual fue el modelo guía para la construcción de los circuitos a utilizar.

FIGURA 74: CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO



(TERCO, 2006)

Para esta práctica hay que recordar que el impulso a analizar es el impulso de maniobra, para ello se identificaron los elementos que debieron ser reemplazados. Por lo tanto, tenemos que los elementos HV9122, HV9123 fueron los elementos a ser sustituidos para obtener el impulso.

- HV9122 / 55 K Ω / resistencia de frente.
- HV9123 / 118 K Ω / resistencia de cola.

Es de suma importancia realizar esta verificación de elementos. Posterior a esto se procedió al armado del circuito para realizar dicho impulso.

FIGURA 75: ARMADO DE CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO.



(LOS AUTORES)

FIGURA 76: ARMADO DE ELEMENTOS DE CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSO.



(LOS AUTORES)

Como se muestra en las Fig. 75 y Fig. 76, se procedió al armado del circuito de generación de impulso. Antes de proceder a energizar este circuito se debió verificar elementos importantes como la conexión del capacitor de acoplamiento HV9130, las sondas HV9152 - HV9151. Elementos que deben tener una inspección visual para verificar su correcta conexión ya que su funcionalidad es de suma importancia para poder verificar el comportamiento del impulso.

Una vez realizado todos estos pasos, se procedió a energizar el circuito para obtener los resultados que se muestran a continuación.

FIGURA 77: CONTROL VISUAL PARA PRUEBAS DE GENERACIÓN DE IMPULSO.



(LOS AUTORES)

Al realizar la primera prueba de laboratorio de generación de impulso, se realizó la prueba con una distancia de espinterómetro de 5 mm con un voltaje de 45100 V. Teniendo como los resultados de la tabla a continuación.

TABLA 14: GENERACIÓN DE VOLTAJE A 45100 V. (PRACTICO).

Generación de voltaje a 45100 V con distancia de 5 mm entre explosores	
Tiempo (μs)	Voltaje simulado (V)
2.40E-05	11840
9.24E-05	30720
1.39E-04	35200
2.08E-04	37120
2.54E-04	36800
3.23E-04	37120
4.62E-04	36800
2.01E-03	23040
2.24E-03	21440
2.33E-03	20800
2.49E-03	19904
2.52E-03	19840
2.79E-03	17920
3.28E-03	14720
3.76E-03	12480
4.27E-03	10240
5.01E-03	7040
6.07E-03	6080

(LOS AUTORES)

Otro de los aspectos que se tomó en cuenta es la eficiencia del impulso donde en aspectos ideales se esperaría que sea de igual magnitud del voltaje de entrada, pero en este caso se obtienen los siguientes valores.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{valor máximo tabulado}}{\text{voltaje inicial}} * 100\%$$

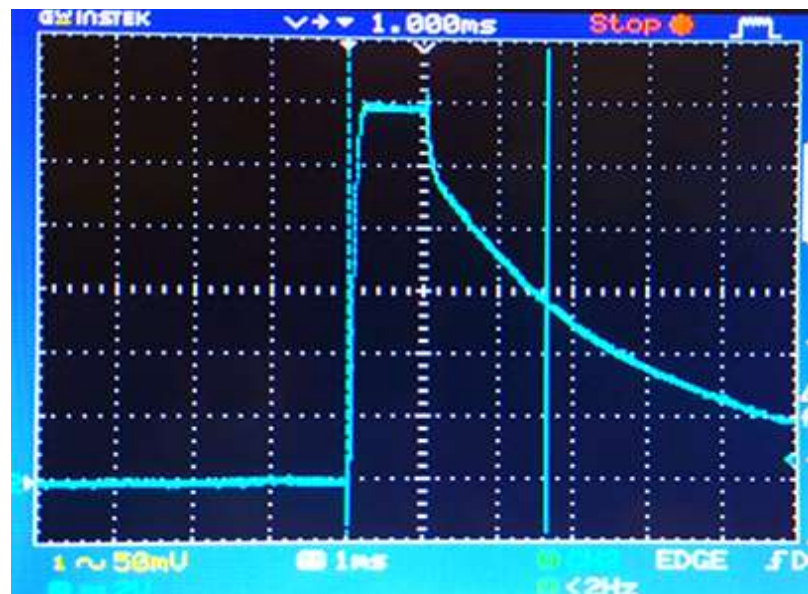
$$\text{Eficiencia} = \frac{37120.006}{45100} * 100\% = 82.306\%$$

TABLA 15: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE TIEMPO REAL VS TIEMPO IDEAL A 45100 V. (PRÁCTICO).

Porcentaje de error entre tiempo real vs tiempo ideal			
Tiempo	Tiempo real (s)	Tiempo ideal (s)	% Error
Tiempo Tp (s)	0.000222	0.000250	11.2
Tiempo T2 (s)	0.002676	0.00250	7.04

(LOS AUTORES)

FIGURA 78: IMPULSO DE GENERACIÓN A 45100 V (OSCILOSCOPIO).



(LOS AUTORES)

En el primer caso se observa un corte en el voltaje máximo de la onda, el mismo que tiene como nombre contorneo de onda, el comportamiento de la onda de impulso puede verse afectada por diversos factores.

La siguiente prueba se dio con una separación del espinterómetro de 10 mm; son necesarios 59100 V para poder generar el impulso con dicha distancia entre esferas. Los resultados de esta prueba fueron los siguientes.

TABLA 16: GENERACIÓN DE VOLTAJE A 59100 V. (PRÁCTICO).

Generación de voltaje a 59100 V con distancia de 10 mm entre explosores	
Tiempo (μs)	Voltaje simulado (V)
1.20E-04	42240
1.60E-04	46080
2.00E-04	47360
2.40E-04	48000
2.54E-04	49280
3.20E-04	48000
3.60E-04	47680
4.40E-04	47360
1.92E-03	29440
2.00E-03	28480
2.12E-03	27520
2.32E-03	25920
2.40E-03	24960
2.50E-03	26560
2.68E-03	22400
2.84E-03	21120
3.00E-03	20160

(LOS AUTORES)

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{valor máximo tabulado}}{\text{voltaje inicial}} * 100\%$$

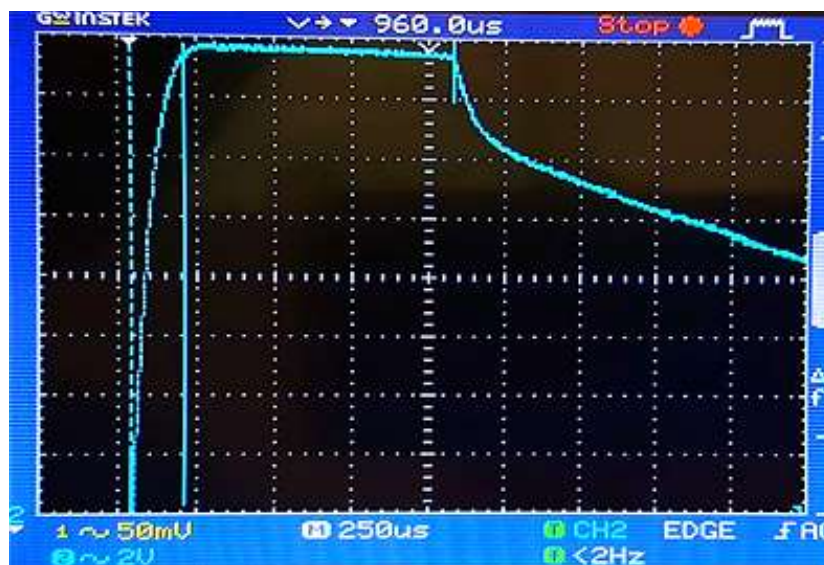
$$\text{Eficiencia} = \frac{49280}{59100} * 100\% = 83.3840\%$$

TABLA 17: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE TIEMPO REAL VS TIEMPO IDEAL A 59100 V. (PRÁCTICO).

Porcentaje de error entre tiempo real vs tiempo ideal			
Tiempo	Tiempo real (s)	Tiempo ideal (s)	% Error
Tiempo Tp (s)	0.000254	0.000250	1.60
Tiempo T2 (s)	0.002520	0.002500	0.80

(LOS AUTORES)

FIGURA 79: IMPULSO DE GENERACIÓN A 59100 V (OSCILOSCOPIO).



(LOS AUTORES)

Para concluir con las pruebas prácticas se hizo con una separación de 15 mm a un voltaje de 74800 V., dando los siguientes resultados.

TABLA 18: GENERACIÓN DE VOLTAJE A 74800 V. (PRÁCTICO).

Generación de voltaje a 74800 V con distancia de 15 mm entre explosores	
Tiempo (μs)	Voltaje simulado (V)
2.30E-06	16000
4.00E-05	30720
7.00E-05	44800
1.40E-04	59840
1.80E-04	61760
2.00E-04	62400
2.30E-04	62720
2.40E-04	62720
3.00E-04	63040
3.70E-04	63040
4.40E-04	62400
5.00E-04	62400
6.00E-04	62400
8.00E-04	62400
9.00E-04	62400
1.20E-03	49920
1.50E-03	44800
2.00E-03	37440

2.17E-03	35200
2.29E-03	33920
2.38E-03	32960
2.51E-03	31360

(LOS AUTORES)

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{valor máximo tabulado}}{\text{voltaje inicial}} * 100\%$$

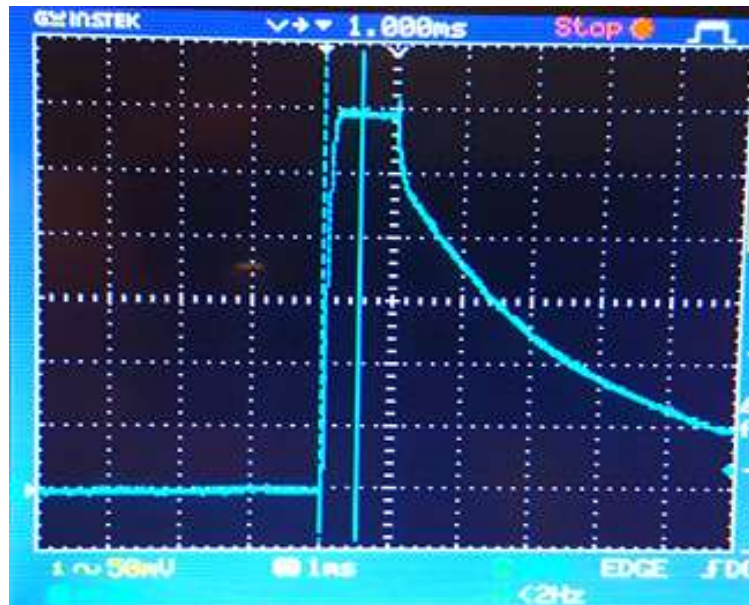
$$\text{Eficiencia} = \frac{62720}{74800} * 100\% = 83.8502\%$$

TABLA 19: PORCENTAJE DE ERROR ENTRE TIEMPO REAL VS TIEMPO IDEAL A 74800 V. (PRÁCTICO).

Porcentaje de error entre tiempo real vs tiempo ideal			
Tiempo	Tiempo real	Tiempo ideal	% Error
Tiempo Tp (s)	0.000254	0.000250	4.00
Tiempo T2 (s)	0.002510	0.002500	0.400

(LOS AUTORES)

FIGURA 80: IMPULSO DE GENERACIÓN A 74800 V (OSCILOSCOPIO).



(LOS AUTORES)

4.2.3. Comparación de resultados.

Para el análisis de los resultados fue necesario poder realizar una comparación de resultados, los mismos que deben ser semejantes en porcentaje al del modelado matemático y cumplir también con los estándares y/o normativas de sobretensiones de maniobra.

A continuación tenemos los resultados de los dos procesos en simultáneo.

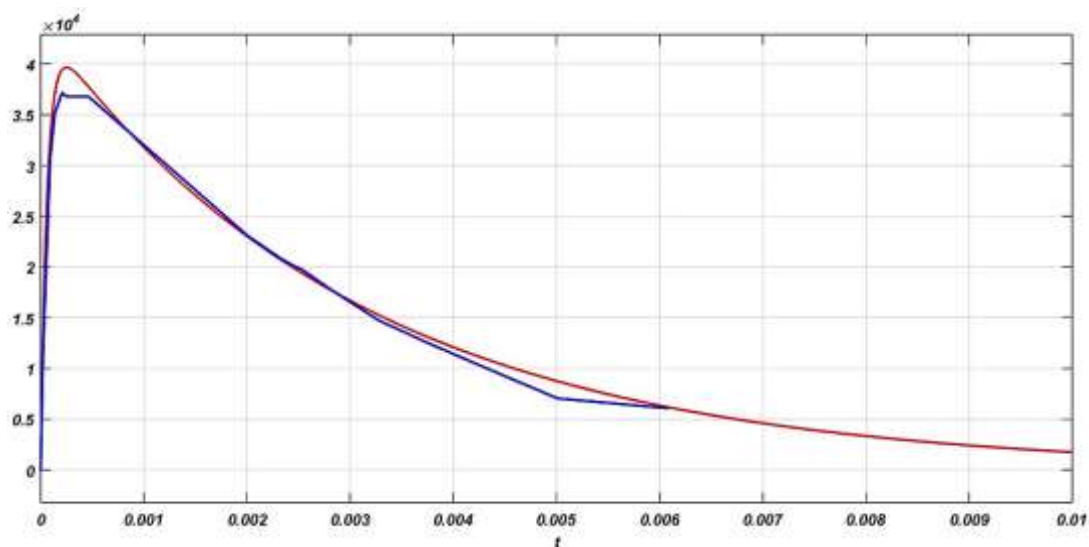
Para el nivel de voltaje de 45100 V. y una separación de 5 mm se obtuvo los resultados de la siguiente tabla.

TABLA 20: COMPARACIÓN DE RESULTADOS A 45100 V Y SEPARACIÓN A 5 MM

Tiempo (s)	Voltaje Simulación (V)	Voltaje osciloscopio (V)	Voltaje real (V)	Error (%)
2.40E-05	13170	14.8	11840	10.099
9.24E-05	32500	38.4	30720	5.477
1.39E-04	37120	44	35200	5.172
2.08E-04	39430	46.4	37120	5.858
2.54E-04	39660	46	36800	7.211
3.23E-04	39280	46.4	37120	5.499
4.62E-04	37780	46	36800	2.594
6.70E-04	35360	45.6	36480	3.167
2.31E-04	39545	46.8	37440	5.323
1.36E-03	28290	36.8	29440	4.065
2.01E-03	22960	28.8	23040	0.348
2.24E-03	21320	26.8	21440	0.563
2.33E-03	20690	26	20800	0.532
2.49E-03	19640	24.88	19904	1.344
2.52E-03	19500	24.8	19840	1.744
2.79E-03	17890	22.4	17920	0.168
3.28E-03	15250	18.4	14720	3.475
3.76E-03	13040	15.6	12480	4.294
4.27E-03	11070	12.8	10240	7.498
5.01E-03	8727	8.8	7040	19.331
6.07E-03	6197	7.6	6080	1.888
7.07E-03	4500	6.8	5440	20.889
				5.297 %

(LOS AUTORES)

FIGURA 81: COMPARACIÓN DE GRÁFICA REAL VS GRÁFICA SIMULADA A 45100 V.



(LOS AUTORES)

Este trabajo de titulación tiene como objetivo principal construir elementos que se acoplen a la realidad del laboratorio de alta tensión para la elaboración de prácticas, que ayuden al aprendizaje de la materia de alta tensión, a su vez uno de los objetivos principales es que los elementos cumplan con los requerimientos estructurales y experimentales como lo son las normativas para la generación de impulso y el cumplimiento de sus tiempos estandarizados y/o normalizados sabiendo que los tiempos son:

- 250 $\mu\text{s} \pm 20\%$
- 2500 $\mu\text{s} \pm 60\%$

Teniendo en cuenta estos datos, se procedió al cálculo de la eficiencia o margen de error del equipo con respecto a sus tiempos ideales.

$$\% \text{ Error Tiempo } (T_p) = \left| \frac{\text{Tiempo ideal} - \text{Tiempo experimental}}{\text{Tiempo ideal}} * 100\% \right|$$

$$\% \text{ Error Tiempo } (T_p) = \left| \frac{0.000250 - 0.000254}{0.000250} * 100\% \right| = 1.6\%; \text{ } \mathbf{1.6\% < \pm 20\%}$$

$$\% \text{ Error Tiempo } (T_2) = \left| \frac{\text{Tiempo ideal} - \text{Tiempo experimental}}{\text{Tiempo ideal}} * 100\% \right|$$

$$\% \text{ Error Tiempo } (T_2) = \left| \frac{0.002500 - 0.002520}{0.002500} * 100\% \right| = 0.8 \% ; \mathbf{0.8\% < \pm 60\%}$$

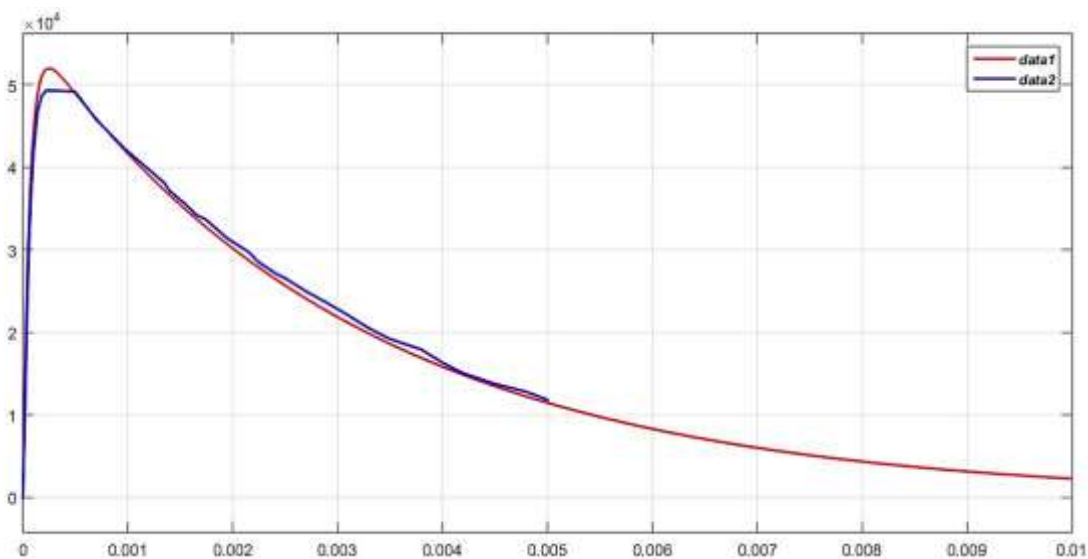
Para el nivel de voltaje de 59100 V. y una separación de 8 mm se obtuvo los resultados de la siguiente tabla.

TABLA 21: COMPARACIÓN DE RESULTADOS A 59100 V Y SEPARACIÓN A 8 MM

Tiempo (s)	Voltaje Simulación (V)	Voltaje osciloscopio (V)	Voltaje real (V)	Error (%)
1.20E-04	46240	10.56	42240	8.65051903
1.60E-04	50190	11.52	46080	8.18888225
2.00E-04	51670	11.84	47360	8.34139733
2.40E-04	51945	12	48000	7.59457118
2.54E-04	51970	12.32	49280	5.17606311
3.20E-04	51480	12	48000	6.75990676
3.60E-04	51045	11.92	47680	6.59222255
4.40E-04	50560	11.84	47360	6.32911392
6.80E-04	46165	11.84	47360	2.5885411
1.16E-03	39630	9.68	38720	2.29624022
1.40E-03	36520	8.8	35200	3.61445783
1.56E-03	34665	8.4	33600	3.07226309
1.80E-03	32300	7.68	30720	4.89164087
1.92E-03	31585	7.36	29440	6.79119835
2.00E-03	30210	7.12	28480	5.7265806
2.12E-03	28890	6.88	27520	4.7421253
2.32E-03	27120	6.48	25920	4.42477876
2.40E-03	26520	6.24	24960	5.88235294
2.50E-03	25645	6.64	26560	3.56794697
2.68E-03	24250	5.6	22400	7.62886598
2.84E-03	22850	5.28	21120	7.57111597
3.00E-03	22020	5.04	20160	8.44686649
3.24E-03	20280	4.56	18240	10.0591716
3.40E-03	19250	4.32	17280	10.2337662
3.96E-03	15700	3.68	14720	6.24203822
4.32E-03	14400	3.36	13440	6.66666667
4.76E-03	12995	2.88	11520	11.3505194
5.00E-03	11440	2.72	10880	4.8951049
5.20E-03	10780	2.4	9600	10.9461967
5.56E-03	9566	2.08	8320	13.0252979
				6.7432137 %

(LOS AUTORES)

FIGURA 82: COMPARACIÓN DE GRÁFICA REAL VS GRÁFICA SIMULADA A 59100 V.



(LOS AUTORES)

$$\% \text{ Error Tiempo } (T_p) = \left| \frac{\text{Tiempo ideal} - \text{Tiempo experimental}}{\text{Tiempo ideal}} * 100\% \right|$$

$$\% \text{ Error Tiempo } (T_p) = \left| \frac{0.000250 - 0.000254}{0.000250} * 100\% \right| = 1.60\% ; \mathbf{1.60\% < \pm 20\%}$$

$$\% \text{ Error Tiempo } (T_2) = \left| \frac{\text{Tiempo ideal} - \text{Tiempo experimental}}{\text{Tiempo ideal}} * 100\% \right|$$

$$\% \text{ Error Tiempo } (T_2) = \left| \frac{0.002500 - 0.002700}{0.002500} * 100\% \right| = 8.0\% ; \mathbf{8.0\% < \pm 60\%}$$

Para el nivel de voltaje de 74800 V. y una separación de 10 mm se obtuvo los resultados de la siguiente tabla.

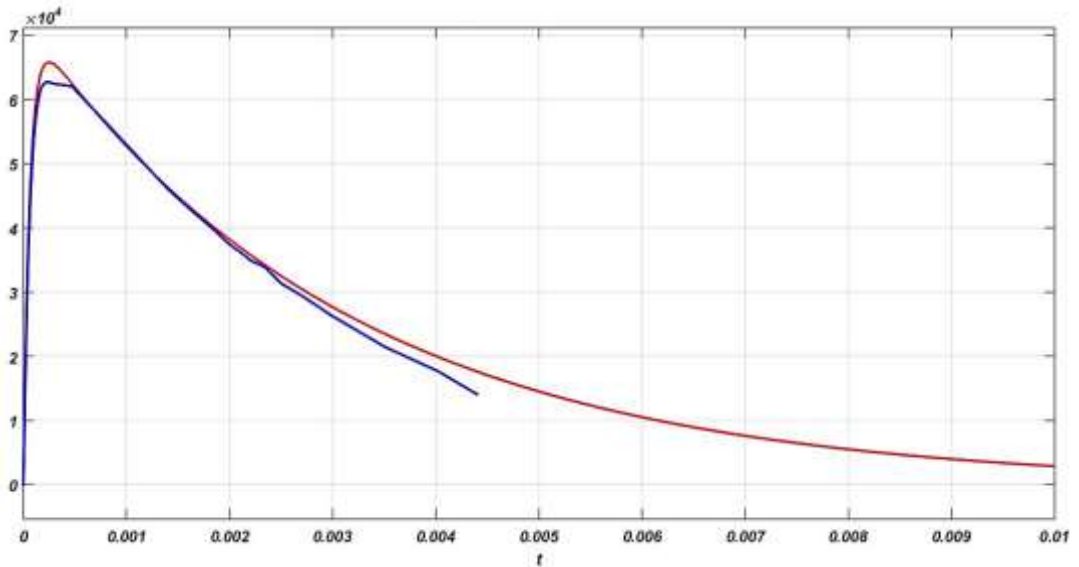
TABLA 22: COMPARACIÓN DE RESULTADOS A 748100 V Y SEPARACIÓN A 10 MM

Tiempo (s)	Voltaje Simulación (V)	Voltaje Real (V)	Error (%)
2.30E-06	2.18E+04	16000	26.7399267
4.00E-05	36800	30720	16.5217391
7.00E-05	47000	44800	4.68085106
1.40E-04	61570	59840	2.80980997
1.80E-04	64720	61760	4.57354759
2.00E-04	65400	62400	4.58715596

2.30E-04	65710	62720	4.55029676
2.40E-04	65780	62720	4.65186987
3.00E-04	65500	63040	3.75572519
3.70E-04	64400	63040	2.11180124
4.40E-04	63100	62400	1.10935024
5.00E-04	61800	62400	0.97087379
6.00E-04	60000	62400	4
8.00E-04	56100	62400	11.2299465
9.00E-04	54400	62400	14.7058824
1.20E-03	49400	49920	1.05263158
1.50E-03	44900	44800	0.22271715
2.00E-03	37800	37440	0.95238095
2.17E-03	36200	35200	2.76243094
2.29E-03	34800	33920	2.52873563
2.38E-03	33800	32960	2.4852071
2.45E-03	33070	31360	5.17084971
			4.54468 %

(LOS AUTORES)

FIGURA 83: COMPARACIÓN DE GRÁFICA REAL VS GRÁFICA SIMULADA A 74800 V.



(LOS AUTORES)

$$\% \text{ Error Tiempo } (T_p) = \left| \frac{\text{Tiempo ideal} - \text{Tiempo experimental}}{\text{Tiempo ideal}} * 100\% \right|$$

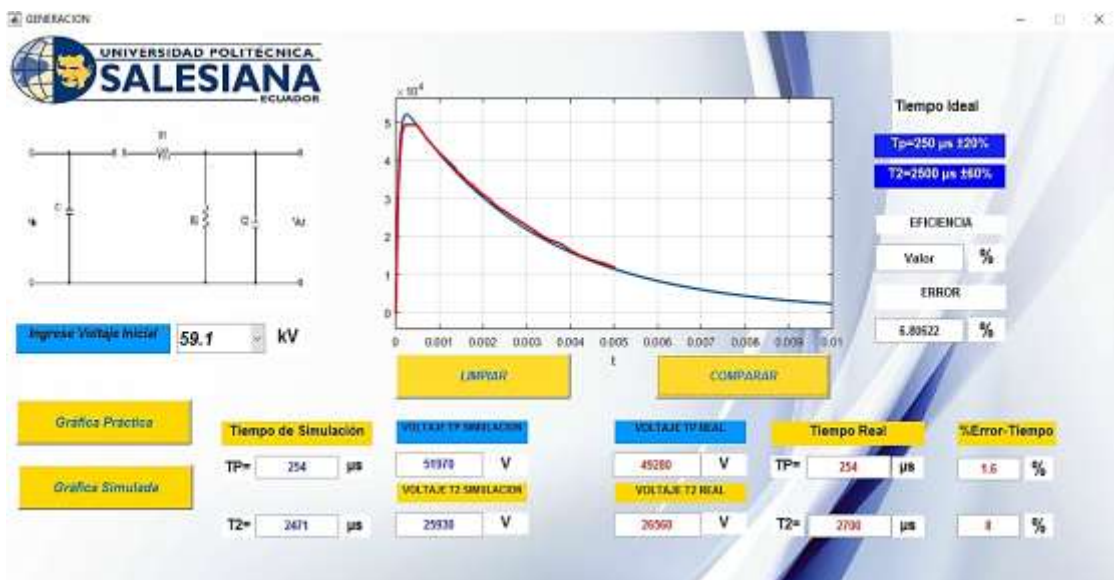
$$\% \text{ Error Tiempo } (T_p) = \left| \frac{0.000250 - 0.000240}{0.000250} * 100\% \right| = 4.0\% ; \mathbf{4.0\% < \pm 20\%}$$

$$\% \text{ Error Tiempo } (T_2) = \left| \frac{\text{Tiempo ideal} - \text{Tiempo experimental}}{\text{Tiempo ideal}} * 100\% \right|$$

$$\% \text{ Error Tiempo } (T_2) = \left| \frac{0.002500 - 0.002510}{0.002500} * 100\% \right| = 0.40\% ; \mathbf{0.40\% < \pm 60\%}$$

El resultado final del análisis de sobretensiones de maniobra basado en el modelado matemático de la misma, fue la interfaz gráfica en MATLAB® como se muestra en la Fig. 84.

FIGURA 84: COMPARACIÓN FINAL DE GRÁFICA REAL VS GRÁFICA SIMULADA DE IMPULSO DE MANIOBRA.



(LOS AUTORES)

CONCLUSIONES

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo, realizar mediante el modelado matemático la simulación de una señal de impulso de tipo maniobra en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana; de lo cual se concluye lo siguiente:

1. El circuito más idóneo para realizar el modelado matemático y extraer las ecuaciones que gobiernan al circuito generador de voltaje de impulso es el de simple etapa A, debido a que su rendimiento con respecto a la función de salida de voltaje es más alto que el circuito de simple etapa B.
2. El software matemático MATLAB[®], fue de mucha utilidad para la representación gráfica de la función obtenida y observar el comportamiento de la señal del modelado matemático.
3. El cálculo de la resistencia de aislamiento fue un requerimiento importante al momento de la construcción de los elementos resistivos para realizar las pruebas en el laboratorio de alta tensión la Universidad Politécnica Salesiana
4. De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas se determinó que los elementos resistivos cumplen con las necesidades del laboratorio de alta tensión, donde el margen de error máximo en T_p (Tiempo Pico) oscila entre 1.6% y 4%, valores que están muy por debajo del margen de error establecido en la normativa IEC 600701 – 1, que es de $\pm 20\%$, valores dados en micro segundos (μs). De igual forma, los resultados en el tiempo T_2 dieron un margen de error que oscila entre 0.8% y 8%; con respecto a la normativa que es de $\pm 60\%$.

Consideramos que los resultados obtenidos de la construcción de los elementos resistivos fueron satisfactorios; ya que se ajustan a los tiempos ideales o normalizados para la generación de impulsos de tipo maniobra contemplados en la normativa de la referencia.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar tres pruebas de impulso con distancias de las esferas del espinterómetro a 5, 8 y 10 mm; ya que, por cuestiones de temperatura, presión, aire y demás factores, la primera prueba puede arrojar valores de voltaje de ruptura muy bajo, descartando la que esté por debajo del promedio de las demás pruebas.

Verificar las distancias de las esferas del espinterómetro para las prácticas a realizarse en el laboratorio, pudiendo acoplar los niveles de voltaje los cuales la ruptura dieléctrica de dichas pruebas sean las más idóneas; pudiéndolas acoplarlas en el programa de simulación de MATLAB®.

Tener muy en cuenta los aspectos de seguridad y procedimientos en el laboratorio al momento de manipular los equipos y realizar las pruebas; ya que, debemos tener siempre presente que se está trabajando con niveles de alto voltaje y con equipos costosos.

BIBLIOGRAFÍA

- 24hs, C. (2004). Electrodinámica. México: Colegio 24hs.
- Acens. (08 de 2012). WHITEPAPER:Framework para el desarrollo ágil de aplicaciones. Obtenido de <http://www.acens.com/wp-content/images/2014/03/frameworks-white-paper-acens-.pdf>
- Aguirre Alonso, A. A., & Villavicencio Vera, J. J. (Marzo de 2015). Repositorio UPS. Obtenido de Ingeniería Eléctrica GYE - Tesis de Pregrado: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10252>
- Almendarez Amador, D. (2004). Curso de Electrónica II . México: Instituto Politécnico Nacional .
- ARCONEL. (2015). Obtenido de http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/REGULACION_ARCONEL_001_15.pdf
- Arias Arias, A. F., & Gutama Valladares, J. F. (Enero de 2015). Repositorio UPS. Obtenido de Ingeniería Eléctrica CUE - Tesis Pregrado: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7991>
- Barreto, M. C. (Febrero de 2015). DocSlide. Obtenido de <http://docslide.us/documents/93709820-iec-60071-1-en-espanolpdf.html>
- Blandon, J. (Enero de 2016). DocSlide. Obtenido de <http://docslide.com.br/documents/conferencia-ingenieria-desempeno-jaime-blandon.html>
- Buban, P. S., & Marshall, L. (1983). Electricidad y electrónica básicas: conceptos y aplicaciones. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Carrasco, J. L. (2005). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - Chile. Obtenido de Generación de Impulsos de alta tensión para diversas aplicaciones : <http://lep.eie.pucv.cl/TesisJoseLuisBravo.pdf>
- Cruz Gómez, J. M., & Gallego Calvo, J. (2014). Instalaciones de puesta a tierra y protección de sistemas eléctricos. Barcelona: Ediciones Experiencia.
- Eirez Izquierdo, J. E. (2011). Repositorio Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. CUJAE. Obtenido de Generador de pulsos de alto voltaje y corta duración: <http://biblos.uamerica.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=573882>

- Endesa Educa. (2014). Obtenido de http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/funcionamiento-de-los-transformadores
- FLUKE CORPORATION INC. (2016). Obtenido de www.fluke.com
- Fowler, R. J. (1994). Electricidad Principios y Aplicaciones. Barcelona: Reverté, S.A.
- GARCIA LAGOS, F. A., & TORRES ISLAS, U. (Agosto de 2012). Obtenido de <http://hdl.handle.net/123456789/10561>
- Gómez Arango, S. (2015). Repositorio Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de Diseño y construcción de un generador de impulsos de alta tensión, portátil y didáctico.: <http://www.bdigital.unal.edu.co/50618/>
- Grainger, J. J., Stevenson Jr, W. D., & Lozano Sousa, C. (1996). Análisis de Sistemas de Potencia. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Gussow, M. (2004). Fundamentos de Electricidad. McGraw-Hill.
- INDUCOR UTNLAT. (2009). INDUCOR. Obtenido de ELECTRICAL TESTING GROUP: <http://www.inducor.com.ar/articulos-tecnicos/marco-referencial-generadores-de-impulso.pdf>
- Juárez Cervantes, J. D. (2006). Instalaciones Eléctricas en Alta Tensión. Tomo I . México: Instituto Politécnico Nacional .
- Mathworks. (2016). Learn with MATLAB and Simulink Tutorials. Obtenido de <http://www.mathworks.com/support/learn-with-matlab-tutorials.html>
- Mathworks. (s.f.). Mathworks Inc. Obtenido de Create a graphical user interface using GUIDE, the graphical user interface development environment of MATLAB.: <http://es.mathworks.com/videos/creating-a-gui-with-guide-68979.html>
- Ministerio de Electricidad y Energías Renovables. (2015). Obtenido de <http://www.energia.gob.ec/>
- Morejón Pinto, V. E. (2016). Repositorio UTA. Obtenido de <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23060>
- Padilla Guarnizo, J. L., & Rodríguez Calle, J. L. (Julio de 2013). Repositorio UPS. Obtenido de Ingeniería Eléctrica CUE - Tesis Pregrado: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4836>
- Perez, P. A. (2009). Transformadores de Distribución: Teoría, cálculo, construcción y pruebas. REVERTE EDICIONES.
- Pérez, S. A. (s.f.). Repositorio Universidad de Colombia . Obtenido de Diseño de un Generador de Impulsos de Voltaje de Corta Duración:

http://www.academia.edu/7326758/UNIVERSIDAD_NACIONAL_DE_COLOMBIA_ALTO_VOLTAJE

- Pimienta Dueñas, A. M. (2007). Conceptos básicos de máquinas eléctricas . Pinar del Rio: El Cid Editor - Ingeniería .
- Pozueta, M. A. (s.f.). Universidad de Cantabria. Obtenido de <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/autotrafos.pdf>
- Radio-Electronics, P. a. (2013). Physics and Radio-Electronics. Obtenido de <http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/passive-components/resistors/wirewoundresistor.html>
- Ramírez, E. E. (2008). Repositorio Universidad de San Carlos de Guatemala. Obtenido de Facultad de ingeniería : http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0667_EA.pdf
- Rela, A. (2010). Electricidad y Electrónica. Buenos Aires: Ministerio de Educación de a Nación.
- Sheeba, R., Jayaraju, M. y., & Kunju, T. (2012). Simulation of Impulse Voltage Generator and Impulse Testing of Insulator. World Journal of Modelling and Simulation, 1-3.
- TERCO. (Julio de 2009). TERCOSWEDEN. Obtenido de <http://www.tercosweden.com/wp-content/uploads/2009/07/HV-20110222-lowres.pdf>
- TERCO. (s.f.). HV 900 High Voltage Modular Training Set.
- Torresi, A. A. (2003). Sobretensiones: Coordinación de la Aislación . Córdoba: Jorge Sarmiento Editor - Universitas .
- Torresi, A. A. (Enero, 2004). Mediciones en Alta Tensión. Córdoba: Jorge Sarmiento Editor - Universitas.
- Velasco, J. M. (2020). Análisis de transitorios elementos electromagnéticos. McGraw-Hill.

ANEXOS

PRUEBA TEÓRICA DE CALIBRACIÓN EN RESISTENCIA DE 55 KΩ.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{55 \text{ V}}{55.000 \Omega} = 0.001 \text{ A} = 1 \text{ mA} \quad (\text{Cálculo Teórico})$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110 \text{ V}}{55.000 \Omega} = 0.002 \text{ A} = 2 \text{ mA}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{165 \text{ V}}{55.000 \Omega} = 0.003 \text{ A} = 3 \text{ mA}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220 \text{ V}}{55.000 \Omega} = 0.004 \text{ A} = 4 \text{ mA}$$

CÁLCULO TEÓRICO DE RESISTENCIA 55K Ω.

Voltaje inducido (V)	Cálculo teórico de resistencia de 55 KΩ			
	Voltaje %	Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Corriente (mA)
55	25	55000	0.001	1
110	50	55000	0.002	2
165	75	55000	0.003	3
220	100	55000	0.004	4

PRUEBA PRÁCTICA DE CALIBRACIÓN EN RESISTENCIA DE 55 KΩ.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{54.97 \text{ V}}{0.00101 \text{ A}} = 54425.74 \Omega = 54.4257 \text{ K}\Omega \quad (\text{Cálculo Práctico})$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{110.1 \text{ V}}{0.00201 \text{ A}} = 54776.194 \Omega = 54.776 \text{ K}\Omega$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{165.6 \text{ V}}{0.003 \text{ A}} = 55200 \Omega = 55.200 \text{ K}\Omega$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{213.8 \text{ V}}{0.0039 \text{ A}} = 54820.512 \Omega = 54.820 \text{ K}\Omega$$

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{\text{Valor Teórico} - \text{Valor Práctico}}{\text{Valor Teórico}} * 100\% \right|$$

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{55000 - 54425.742}{55000} * 100\% \right| = 1.044\%$$

CÁLCULO PRÁCTICO DE RESISTENCIA 55 KΩ Y MARGEN DE ERROR

Voltaje inducido (V)	Cálculo práctico de resistencia de 55 KΩ y margen de error				
	Voltaje %	Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Corriente (mA)	Error %
54.97	25	54.42574257	0.00101	1.01	1.044104
110.1	50	54.7761194	0.00201	2.01	0.407055
165.6	75	55200	0.003	3	0.363636
213.8	100	54.82051282	0.0039	3.9	0.326340
					0.535284%

PRUEBA TEÓRICA DE CALIBRACIÓN EN RESISTENCIA DE 118 KΩ.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{55 \text{ V}}{118.000 \Omega} = 0.000466 \text{ A} = 0.466 \text{ mA} \quad (\text{Cálculo Teórico})$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110 \text{ V}}{118.000 \Omega} = 0.000932 \text{ A} = 0.932 \text{ mA}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{165 \text{ V}}{118.000 \Omega} = 0.001398 \text{ A} = 1.398 \text{ mA}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220 \text{ V}}{118.000 \Omega} = 0.001864 \text{ A} = 1.864 \text{ mA}$$

CÁLCULO TEÓRICO DE RESISTENCIA 118K Ω.

Voltaje inducido (V)	Calculo teórico de resistencia de 118 KΩ			
	Voltaje %	Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Corriente (mA)
55	25	118000	0.000466102	0.46610169
110	50	118000	0.000932203	0.93220339
165	75	118000	0.001398305	1.39830508
220	100	118000	0.001864407	1.86440678

PRUEBA PRÁCTICA DE CALIBRACIÓN EN RESISTENCIA DE 118 KΩ.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{55.47 \text{ V}}{0.00047 \text{ A}} = 118021.27 \Omega = 118.021 \text{ K}\Omega \quad (\text{Cálculo Práctico})$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{110.2 \text{ V}}{0.00093 \text{ A}} = 118494.62 \Omega = 118.494 \text{ K}\Omega$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{164.9 \text{ V}}{0.00139 \text{ A}} = 118633.09 \Omega = 118.633 \text{ K}\Omega$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{212.6 \text{ V}}{0.00179 \text{ A}} = 118722.07 \Omega = 118.722 \text{ K}\Omega$$

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{\text{Valor Teórico} - \text{Valor Práctico}}{\text{Valor Teórico}} * 100\% \right|$$

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{118000 - 118021.2766}{118000} * 100\% \right| = 1.044\%$$

CÁLCULO PRÁCTICO DE RESISTENCIA 118 KΩ Y MARGEN DE ERROR.

Voltaje inducido (V)	Cálculo práctico de resistencia de 118 KΩ y margen de error				
	Voltaje %	Resistencia (Ω)	Corriente (A)	Corriente (mA)	Error %
55.47	25%	118.021276	0.00047	0.47	0.018031
110.2	50%	118.494623	0.00093	0.93	0.419172
164.9	75%	118.633093	0.00139	1.39	0.536519
212.6	100%	118.722075	0.00179	1.853	0.611924
					0.396412%

TABLA DE ERRORES

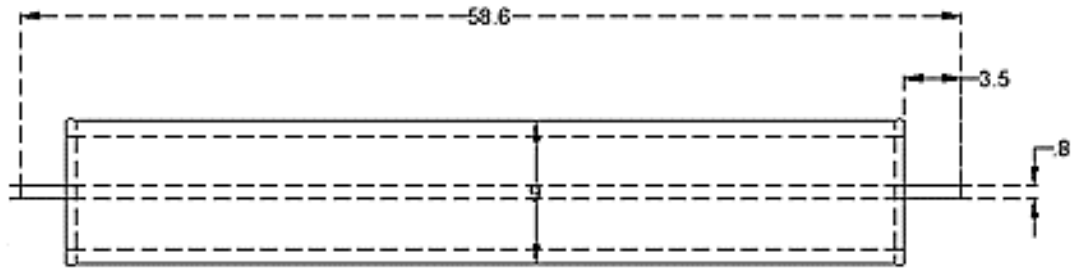
TABLA DE ERROR CON VOLTAJE A 45100 V.			
t	Voltaje Simulación (V)	Voltaje Real (V)	Error (%)
2,40E-05	13170	11840	10,099
9,24E-05	32500	30720	5,477
1,39E-04	37120	35200	5,172
2,08E-04	39430	37120	5,858
2,54E-04	39660	36800	7,211
3,23E-04	39280	37120	5,499
4,62E-04	37780	36800	2,594
6,70E-04	35360	36480	3,167
2,31E-04	39545	37440	5,323
1,36E-03	28290	29440	4,065
2,01E-03	22960	23040	0,348
2,24E-03	21320	21440	0,563
2,33E-03	20690	20800	0,532
2,49E-03	19640	19904	1,344
2,52E-03	19500	19840	1,744
2,79E-03	17890	17920	0,168
3,28E-03	15250	14720	3,475
3,76E-03	13040	12480	4,294
4,27E-03	11070	10240	7,498
5,01E-03	8727	7040	19,331
6,07E-03	6197	6080	1,888
7,07E-03	4500	5440	20,889
			5,297%

TABLA DE ERROR CON VOLTAJE A 59100 V.			
t	Voltaje Simulación (V)	Voltaje Real (V)	Error (%)
1,20E-04	46240	42240	8,650519031
1,60E-04	50190	46080	8,188882247
2,00E-04	51670	47360	8,341397329
2,40E-04	51945	48000	7,594571181
2,50E-04	51970	48480	6,715412738
3,20E-04	51480	48000	6,75990676
3,60E-04	51045	47680	6,592222549
4,40E-04	50560	47360	6,329113924
6,80E-04	46165	47360	2,588541103
1,16E-03	39630	38720	2,296240222
1,40E-03	36520	35200	3,614457831
1,80E-03	32300	30720	4,891640867
1,92E-03	31585	29440	6,791198354
2,00E-03	30210	28480	5,726580602
2,12E-03	28890	27520	4,742125303
2,32E-03	27120	25920	4,424778761
2,40E-03	26520	24960	5,882352941
2,50E-03	25645	24640	3,918892572
2,68E-03	24250	22400	7,628865979
2,84E-03	22850	21120	7,571115974
3,00E-03	22020	20160	8,446866485
3,24E-03	20280	18240	10,0591716
3,40E-03	19250	17280	10,23376623
3,96E-03	15700	14720	6,242038217
4,32E-03	14400	13440	6,666666667
4,76E-03	12995	11520	11,35051943
5,00E-03	11440	10880	4,895104895
5,20E-03	10780	9600	10,94619666
5,56E-03	9566	8320	13,02529793
			6,806223582%

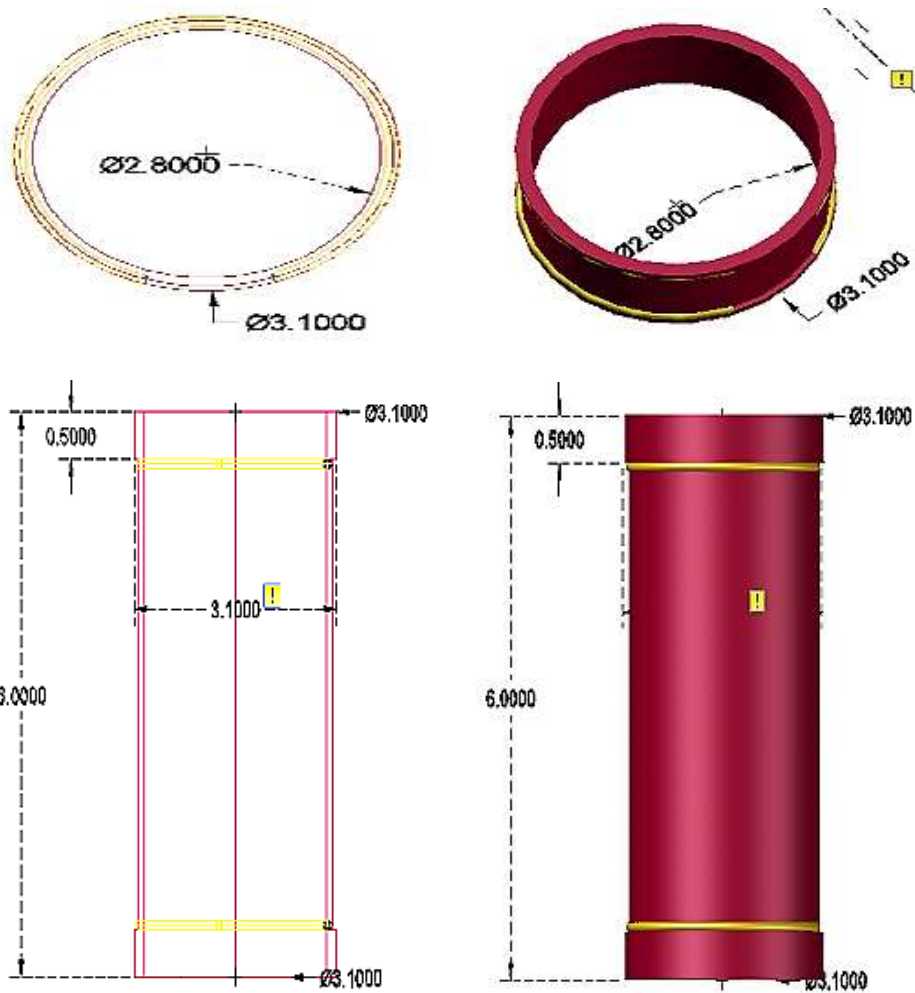
TABLA DE ERROR CON VOLTAJE A 74800 V.			
t	Voltaje Simulación (V)	Voltaje Real (V)	Error (%)
2,30E-06	2,18E+04	16000	26,73992674
4,00E-05	36800	30720	16,52173913
7,00E-05	47000	44800	4,680851064
1,40E-04	61570	59840	2,809809972
1,80E-04	64720	61760	4,57354759
2,00E-04	65400	62400	4,587155963
2,30E-04	65710	62720	4,550296758
2,40E-04	65780	62720	4,651869869
3,00E-04	65500	63040	3,755725191
3,70E-04	64400	63040	2,111801242
4,40E-04	63100	62400	1,109350238
5,00E-04	61800	62400	0,970873786
6,00E-04	60000	62400	4
8,00E-04	56100	62400	11,22994652
9,00E-04	54400	62400	14,70588235
1,20E-03	49400	49920	1,052631579
1,50E-03	44900	44800	0,222717149
2,00E-03	37800	37440	0,952380952
2,17E-03	36200	35200	2,762430939
2,29E-03	34800	33920	2,528735632
2,38E-03	33800	32960	2,485207101
2,45E-03	33070	31360	5,170849713
			4,544466797%

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS A CÁPSULAS DE RESISTENCIAS Y ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS

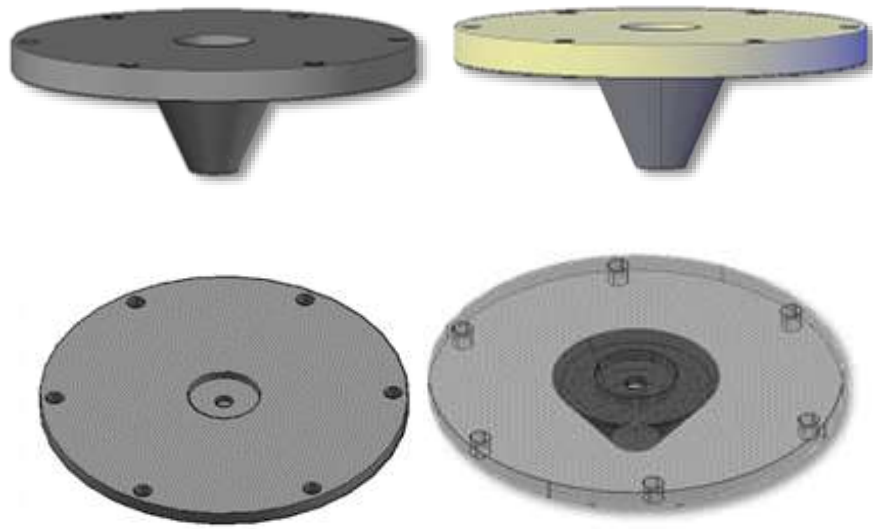
DISEÑO DE LAS RESISTENCIAS DE 55 K Ω Y 118 K Ω .



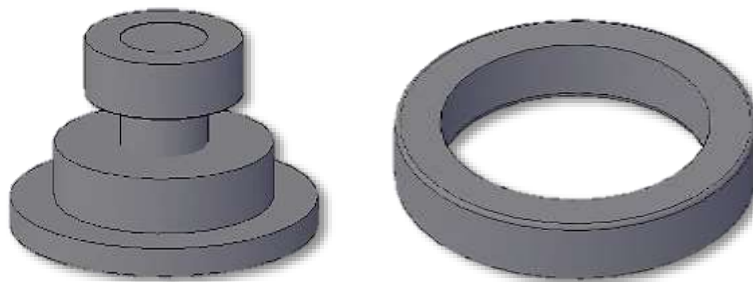
DISEÑO DE CÁPSULAS PARA RESISTENCIAS.



DISEÑO DE TAPAS PARA RESISTENCIAS.

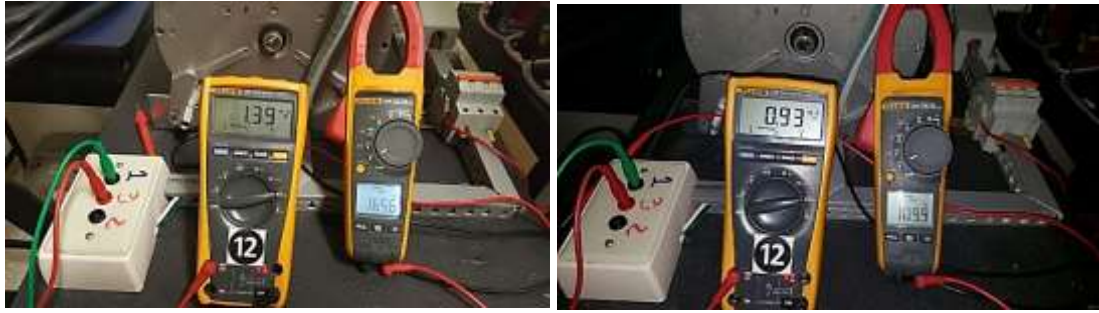


DISEÑO DE PUNTAS PARA RESISTENCIAS.



PRUEBAS DE CALIBRACIÓN DE RESISTENCIA DE 55 KΩ.





PRUEBAS DE CALIBRACIÓN DE RESISTENCIA DE 118 KΩ.



MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE CÁPSULA DE LABORATORIO.





MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE CÁPSULA 1.



MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE CÁPSULA 2 ANTES DE COLOCAR BARNIZ.



MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE CÁPSULA 2 DESPUÉS DE COLOCAR BARNIZ.

